

**Studio preliminare
del disagio bioclimatico
in provincia di Bologna**

Franco Zinoni
Gabriele Antolini

Introduzione

Lo studio rappresenta una prima proposta metodologica da parte del Servizio Meteorologico Regionale alla problematica della meteorologia applicata al corpo umano (biometeorologia umana).

Da alcuni anni la comunità scientifica è attenta all'effetto del clima sulla salute dell'uomo e diversi studi hanno evidenziato le relazioni che esistono tra alcuni dei principali parametri meteorologici (temperatura, vento, umidità) e lo sviluppo di patologie anche gravi che possono interessare, secondo l'andamento climatico, il sistema cardio-vascolare oppure il sistema respiratorio. ARPA-SMR da alcuni anni fornisce indicazioni sulla situazione presente e prevista di disagio da caldo-umido utilizzando i metodi proposti da Scharlau e da Thom. Le indicazioni sono riferite ai siti delle stazioni appartenenti alla rete meteorologica regionale e quindi interessano prevalentemente il territorio di pianura.

Con questo studio si vuol verificare la possibilità di fornire indicazioni alla scala di dettaglio sulla variabilità all'interno del territorio regionale delle condizioni medie di disagio bioclimatico. I dati meteorologici utilizzati nel presente studio, estratti dall'archivio di ARPA-SMR, e relativi alla rete meteorologica dell'Assessorato Agricoltura, sono riferiti principalmente all'area di pianura. Applicazioni alla scala di dettaglio in area collinare e montana, come realizzato nel presente studio, richiederebbero, per una maggiore affidabilità dell'informazione prodotta, specifiche campagne di misure e l'eventuale impiego dei dati telerilevati.

Il presente lavoro preliminare può costituire un interessante campo di applicazione dei dati meteorologici in ambito sanitario, con lo sviluppo di ulteriori e più dettagliate ricerche mirate al perfezionamento della metodologia e al conseguimento di cartografie di base per un'ulteriore applicazione della biometeorologia alla prevenzione sanitaria in ambito regionale.

Brevi cenni di biometeorologia

La biometeorologia, scienza interdisciplinare di recente sviluppo, studia le influenze dei fattori meteorologici sugli organismi. L'uomo, come animale omeotermo, è in grado di mantenere la propria temperatura quasi costante. In realtà, essa varia secondo l'ambiente circostante, con le stagioni, durante la giornata, ed è diversa nei vari punti del corpo. Il complesso sistema di termoregolazione dell'uomo, coordinato dal sistema nervoso centrale, grazie all'ausilio di diversi termorecettori, consente di mantenere la temperatura dei tessuti profondi il più possibile vicino a 37 °C. Tale sistema si avvale di meccanismi di produzione ed eliminazione del calore. Se l'equilibrio è mantenuto con il minimo sforzo, si può parlare di condizioni climatiche di benessere; maggiore è lo sforzo richiesto al sistema di termoregolazione, più ci si allontana dalla condizione d'equilibrio e si può allora parlare di disagio. Il disagio bioclimatico rappresenta quindi l'insieme delle condizioni meteorologiche che concorrono a creare situazioni di malessere fisico per l'uomo. Tutte le grandezze meteorologiche possono contribuire a creare tali situazioni, in particolare: la temperatura, l'umidità, il vento, la radiazione. Spesso i fattori climatici interagiscono tra loro o con altre grandezze dell'aria di tipo chimico, fisico o biologico, a volte in maniera sinergica, rendendo difficile l'analisi dei singoli effetti sulla salute umana. Per esempio la concentrazione d'inquinanti a livello del suolo è strettamente correlata al grado di stabilità atmosferica o alla quantità di radiazione solare. In più, gli effetti d'interazione si manifestano anche come effetto sulla salute: condizioni atmosferiche stressanti favoriscono gli effetti dannosi d'inquinanti di diversa natura.

Negli studi sul disagio bioclimatico ci si riferisce solitamente ai fattori puramente climatici: temperatura, umidità e vento. Sono stati ideati diversi indici biometeorologici, basati su queste grandezze. Tali indici sono calcolati da espressioni contenenti coefficienti individuati in maniera empirica. Per esempio Scharlau [1950] ha introdotto un indice basato su due curve sperimentali (una per il disagio da caldo-umido estivo, una per il disagio da freddo-umido invernale) che, per ogni valore d'umidità relativa, definisce la temperatura oltre la quale, in assenza di vento, l'uomo si trova in

condizioni igrotermiche di disagio. Thom [1959] ha introdotto un indice di disagio da caldo-umido che, considerando le temperature di bulbo asciutto e bagnato, tiene conto delle condizioni termoigrometriche che determinano la cosiddetta temperatura effettiva, cioè la sensazione di calore percepita dall'uomo. Gli indici di Scharlau e di Thom sono calcolati regolarmente, durante l'estate, dal Servizio Meteorologico Regionale (S.M.R.) dell'A.R.P.A. Emilia-Romagna e sono diffusi con le previsioni meteorologiche. Esistono molti altri indici biometeorologici di tipo empirico che considerano temperatura, umidità, velocità del vento. Tali indici sono solitamente determinati dai vari Servizi Meteorologici per il monitoraggio giornaliero del disagio biometeorologico da caldo-umido e da freddo-umido, per avvertire la popolazione sugli eventuali pericoli da colpi di calore o di congelamento. Esistono, infatti, per ogni indice, classi di valori che corrispondono a particolari condizioni di disagio o benessere (vedi ad esempio tab. 1).

DESCRIZIONE	CLASSI
Benessere	DI < 21
Meno del 50% della popolazione prova un leggero disagio	21 <= DI < 24
Oltre il 50% della popolazione prova un crescente disagio	24 <= DI < 27
La maggioranza della popolazione prova disagio e un significativo deterioramento delle condizioni psicofisiche	27 <= DI < 29
Tutti provano un forte disagio	29 <= DI < 32
Stato d'emergenza medica, il disagio è molto forte, il rischio di colpi di calore è pericoloso ed elevato	DI >= 32

Tabella 1 - Classi d'indice di disagio di Thom DI (Discomfort Index) e descrizione della situazione di benessere/disagio bioclimatico.

Nei più recenti studi biometeorologici [per esempio *Blazejczyk*, 1999] si tenta di utilizzare direttamente l'equazione di scambio di calore tra l'uomo e l'ambiente per determinare le situazioni di stress per l'organismo:

$$S = M + R + C + L + E + Res$$

dove S è l'accumulo netto di calore, M la produzione metabolica di calore, R la radiazione solare assorbita, C, L, E e Res gli scambi di calore per convezione, per radiazione ad onda lunga, per evaporazione e respirazione rispettivamente. Anche in questo caso, i coefficienti delle diverse variabili sono individuati solitamente per via empirica.

Climatologia del disagio bioclimatico

Con il presente studio, si è inteso effettuare una prima analisi dei dati climatologici (temperatura, umidità, vento) disponibili nell'archivio del SMR, per caratterizzare il territorio regionale dal punto di vista bioclimatico, con particolare riferimento al disagio per l'uomo. Come indicatore è stato scelto l'indice di Thom, calcolato come segue:

$$DI = 0.4 * (T_a + T_w) + 4.8 \quad (1)$$

dove T_a e T_w sono le temperature di bulbo asciutto e bagnato rispettivamente, con T_a calcolata in ambiente ombreggiato e protetto dal vento. L'indice rappresenta una delle migliori stime della

temperatura “effettiva”, che è una grandezza che considera sinteticamente l'effetto della temperatura, dell'umidità e del vento sulla sensazione di caldo o freddo percepita dall'uomo. Essendo un indice biometeorologico, DI dovrebbe essere calcolato su brevi periodi (un'ora nella versione originale).

L'indice DI esprime un valore orario di caldo-umido che, posto in relazione con due livelli standard (soglie), evidenzia situazioni di benessere ($DI < 24$), leggero malessere fisico ($24 < DI < 28$), oppure di spiccato disagio o malessere ($DI > 28$).

Sommatoria dell'indice di Thom

L'Indice di Thom si presta ad un'applicazione estesa al territorio, siccome i parametri considerati (temperatura e umidità) sono solitamente rilevati in tutte le stazioni meteorologiche. Per effettuare un'analisi climatologica del disagio è necessario definire una metodologia appropriata che permetta di valutare, con un dato sintetico, l'insieme delle informazioni storiche. È possibile considerare su base qualitativa l'insieme dei giorni con appartenenza alle tre classi di disagio (assente, lieve, spiccato), ma come spesso accade quando si elaborano i dati relativi al superamento o meno di soglie, si può ottenere una falsa informazione nei risultati determinata dal fatto che valori numerici apparentemente simili possono dare risultati sostanzialmente differenti (ad es: 23.8 e 24.1), e questa differenza non trova riscontro pratico, come nel caso dell'indice di Thom, dove le soglie di riferimento determinano insiemi numerici distinti con i quali s'identifica un processo biologico continuo.

Sono stati utilizzati dati relativi a 22 stazioni (tra le circa 130 presenti in archivio), scelte in modo tale da avere una buona rappresentatività territoriale a livello regionale. Il periodo considerato corrisponde agli anni 1997-1998, molto breve per avere significatività climatologica, ma completo e sufficiente per la natura preliminare dello studio. Per ciascuna stazione sono a disposizione dati medi, massimi e minimi giornalieri di temperatura e umidità. I dati di vento sono invece presenti solo per 7 stazioni. In realtà, il periodo considerato presenta alcuni “buchi”, perciò si è resa necessaria un'operazione preliminare di ricostruzione dei dati mancanti, in modo da disporre, per gli studi successivi, di una serie completa di dati. I dati ricostruiti sono stati calcolati utilizzando il metodo della regressione lineare tra le coppie di stazioni che presentavano il coefficiente di correlazione migliore. Per utilizzare l'intero set di stazioni è necessario operare con procedure che fanno uso di dati giornalieri, viceversa, l'utilizzo dei dati orari può essere effettuato su un set di stazioni troppo ridotto per il nostro scopo. L'indice DI è un indice orario, ma da precedenti analisi è stato osservato che il valore massimo dell'indice si osserva sistematicamente in corrispondenza della temperatura massima giornaliera, che è a sua volta fortemente correlata con i valori minimi d'umidità dell'aria. Questa considerazione ci ha permesso di calcolare i giorni di disagio dai dati giornalieri utilizzando la serie completa di stazioni. Pertanto, utilizzando le temperature massime e le umidità minime, sono stati ottenuti i valori massimi giornalieri dell'indice DI che rispecchiano le condizioni critiche per ogni sito indagato. Per le motivazioni espresse sopra, è stata inoltre individuata un'ulteriore espressione che sintetizzasse, per ogni stazione, i valori giornalieri di DI utilizzando la sommatoria, per l'intero periodo considerato, dei valori dell'indice superiori a 24, dedotta la soglia:

$$S = \sum_{DI > 24} (DI - 24) \quad (2)$$

Confronto fra dati orari e dati giornalieri

Al fine di verificare la bontà del modello proposto, in particolare se sia lecito l'utilizzo di valori giornalieri e la loro sommatoria, anche in termini di confronto tra i diversi siti, è stato eseguito un test su alcune stazioni meteorologiche per le quali si dispone dei dati orari. Sono stati confrontati i valori della sommatoria per lo stesso periodo calcolati dai dati giornalieri con quelli calcolati utilizzando i dati orari. Il confronto è stato effettuato in termini di rapporto, dato che i valori assoluti sono ovviamente differenti. I rapporti tra le due sommatorie si mantengono costanti nelle diverse stazioni,

perciò possiamo concludere che l'utilizzo dei dati giornalieri, in particolare della temperatura massima e dell'umidità minima, non pregiudica la stima dal punto di vista bioclimatico della differenza che si può riscontrare tra i diversi siti.

Estrapolazione dell'indice al territorio

Le stazioni utilizzate nell'analisi sono state georeferenziate nel sistema informativo geografico (GIS) Arcview. Si è utilizzata l'estensione Spatial Analyst, che consente l'analisi spaziale dei dati in ambiente raster. La metodologia utilizzata per l'estrapolazione è la seguente:

- individuazione delle eventuali correlazioni statistiche tra grandezza bioclimatica (nel nostro caso S) e grandezze geografiche;
- utilizzo delle relazioni individuate per eliminare l'effetto geografico sui valori di S;
- interpolazione (kriging) dei dati "corretti" ;
- reintroduzione dell'effetto geografico.

L'interpolazione dei dati "corretti" consente di determinare la variabilità dell'indice dovuta ai diversi regimi climatici, senza tener conto dell'influenza dell'orografia.

Variazione dell'indice con la quota

Le variabili geografiche considerate nello studio sono essenzialmente di tipo orografico. Come mappa di base, è stato utilizzato un modello digitale dell'altimetria del terreno (DEM: Digital Elevation Model), per determinare gli eventuali effetti dell'orografia sulle grandezze biometeorologiche. Il DEM è una matrice regolare di celle con dimensioni di 250x250 mq, per un totale di 645 righe e 1164 colonne, che ricopre l'intero territorio regionale. Dal DEM, mediante opportuni algoritmi, sono state ricavate alcune mappe derivate quali: pendenza ed esposizione del versante, altezza assoluta (in metri) e relativa (in %) sul fondovalle, ampiezza della valle. A ciascuna stazione meteorologica sono stati associati i rispettivi valori delle suddette variabili, calcolando successivamente mediante regressione lineare multipla, il peso dei diversi fattori sulla variabilità della sommatoria di Thom (S), calcolata come sopra. Non essendo significativo alcun coefficiente, si è allora analizzata la sola sommatoria S in relazione alla quota, utilizzando la curva esponenziale di fig. 1:

$$y = 223 \cdot e^{-0.0037 \cdot z} \quad (3)$$

Per ogni stazione sono stati calcolati gli scarti tra i valori di S osservati e quelli calcolati con la relazione esponenziale. Gli scarti sono stati successivamente interpolati sul territorio mediante kriging ordinario puntuale, utilizzando il software Surfer. Sommando algebricamente la mappa ottenuta in questo modo a quella relativa ai valori di S, calcolati con la (3), si ottiene una copertura che tiene conto dei dati osservati nelle stazioni e della topografia locale. Le figure 2 e 3 rappresentano rispettivamente la mappa ottenuta solo in base all'orografia, secondo la (3) senza utilizzare i dati stazione, e quella che tiene conto di entrambi i fattori.

Effetto dei fattori che alterano la perdita di calore

La procedura originale di Thom è stata ricavata in aree pianeggianti con una ventosità mediamente bassa. La complessità orografica del territorio bolognese incide, più o meno direttamente, sul bilancio di calore in misura molto diversa anche a distanze brevi. Tale influenza è legata sostanzialmente alla differente disposizione dei versanti rispetto al sole e al regime dei venti, dettato dalla conformazione delle valli appenniniche. In attesa di più approfondite analisi e misure, si è cercato di tener conto di questi fattori, considerando in modo prevalentemente arbitrario, basato sull'esperienza personale visto

Effetto della topografia sull'intensità del vento e correzione dell'indice di disagio con il fattore vento

Per inserire la variazione del disagio legata al vento, si è deciso di analizzare il campo medio della velocità del vento, sulla base di una relazione statistica con la quota determinata per le 7 stazioni che presentano tali dati (Fig. 5). La correlazione con il vento medio è stata calcolata per i soli giorni con indice di Thom superiore a 24. Il valore medio del vento è stato corretto per un fattore 1.5 che esprime la maggior ventosità media delle ore diurne rispetto alle ore totali.

Applicando la relazione di fig. 5 (linea verde) al DEM, si ottiene una mappa di vento medio. Si è supposto arbitrariamente una diminuzione del 10% nei valori di S corrispondente ad un aumento della ventosità di 1 m/s. Utilizzando l'espressione (5), è stato possibile ottenere la mappa di Fig. 7 che esprime la variazione territoriale climatica del disagio considerando una combinazione tra l'indice di Thom e l'effetto della radiazione e del vento. La fig. 6 rappresenta la differenza algebrica tra le mappe di S' (dato dalla (4)) e di S''.

$$S'' = S' \cdot \left(1 - \frac{V}{10}\right) \quad (5)$$

I valori negativi di S'' che si otterrebbero nel caso in cui il vento medio raggiungesse valori superiori a 10 m/s, sono stati posti uguali a 0 (casi non rilevanti).

Le figure 8, 9, 10, 11 rappresentano alcuni dettagli della mappa, con riferimenti topografici sullo sfondo.

Considerazioni finali

La mappa di fig. 7 rappresenta la distribuzione territoriale dell'indice di disagio bioclimatico S, in base ai dati di temperatura e umidità registrati nelle stazioni, tenendo conto, in maniera più o meno empirica, dell'influenza dell'orografia sul bilancio di calore e sul vento. Come prevedibile (v. anche le figure 8-11), i valori di disagio elevato si trovano in corrispondenza della pianura, a ridosso della collina e nei fondovalle. In particolare, sono evidenti i valori molto elevati nella zona di Castel San Pietro Terme, dove si sono registrati per il periodo considerato temperature più elevate rispetto a zone simili dal punto di vista orografico.

Con il presente studio, più che raggiungere risultati quantitativamente affidabili, si è cercato di individuare una prima linea metodologica, sicuramente da perfezionare. Si vuol inoltre fornire una base di discussione per le possibili applicazioni della bioclimatologia e della biometeorologia, anche sfruttando le potenzialità degli ormai diffusi strumenti informatici d'analisi geografica. Si ritiene che possano essere avanzate diverse proposte di ricerca, per migliorare la conoscenza dei fenomeni meteorologici che agiscono sul benessere psicofisico dell'uomo, cui possono poi seguire diverse applicazioni operative, come già avviene in altri paesi. Innanzi tutto, sarebbe opportuno predisporre uno studio mirato, in un'area limitata, ma rappresentativa, che preveda una rete di monitoraggio delle variabili più importanti, con un'adeguata distribuzione territoriale, per meglio evidenziare l'influenza di questi ultimi sui diversi indici biometeorologici, considerando inoltre altre possibili fonti di dati che si possono ben adattare allo scopo, come ad esempio i dati da satellite. Oltre all'indice di Thom, andrebbero presi in esame altri metodi per la stima del disagio, che meglio esprimono lo scambio di calore tra l'uomo e l'ambiente. Alcuni modelli mettono in relazione l'influenza dei diversi parametri meteorologici con le varie componenti che intervengono nel bilancio termico tra l'uomo e l'ambiente, ovviando all'approccio parzialmente empirico adottato in questo studio, con la possibilità di definire mappe d'idoneità bioclimatica alla pratica delle diverse attività umane.

L'analisi territoriale realizzata in questo studio, potrebbe rappresentare inoltre un prodotto di base per la realizzazione di previsioni del disagio bioclimatico alla scala di dettaglio, mediante lo sviluppo di uno specifico prodotto di post-elaborazione delle previsioni meteorologiche.

In appendice sono riportati i principali metodi per la stima del disagio bioclimatico attualmente utilizzati nei diversi paesi.

Bibliografia di riferimento:

Scharlau, K., 1950. Einführung eines Schwülemasstabes und Abgrenzung von Schwülezeiten durch Isohygrothermen. Erdkunde, v.4, pp.188-201.

Thom E.C., Bosen J.F., 1959. The discomfort index. Weatherwise, 12: 57-60.

Blazejczyk K., Krawczyk B., 1999. Tourist and Recreational Abilities of Bioclimate of North-Eastern Poland. Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, November 8 – 12, Sydney, Australia.

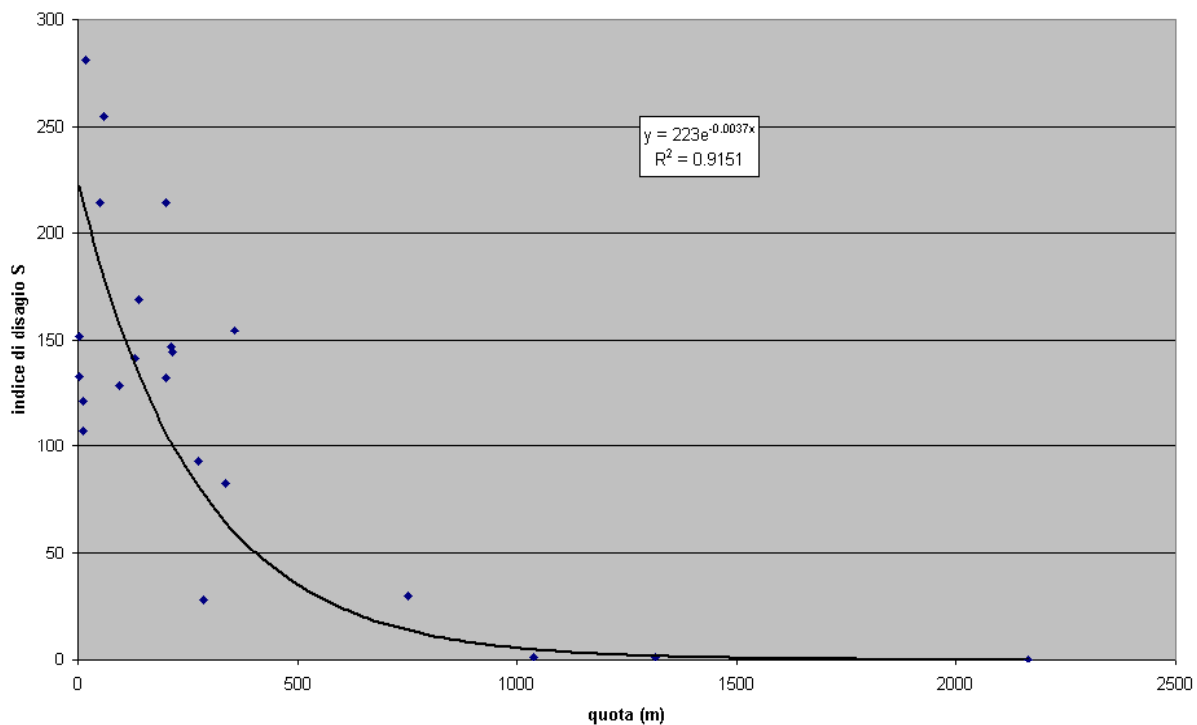


Fig. 1 – Relazione tra quota e indice di disagio bioclimatico S.

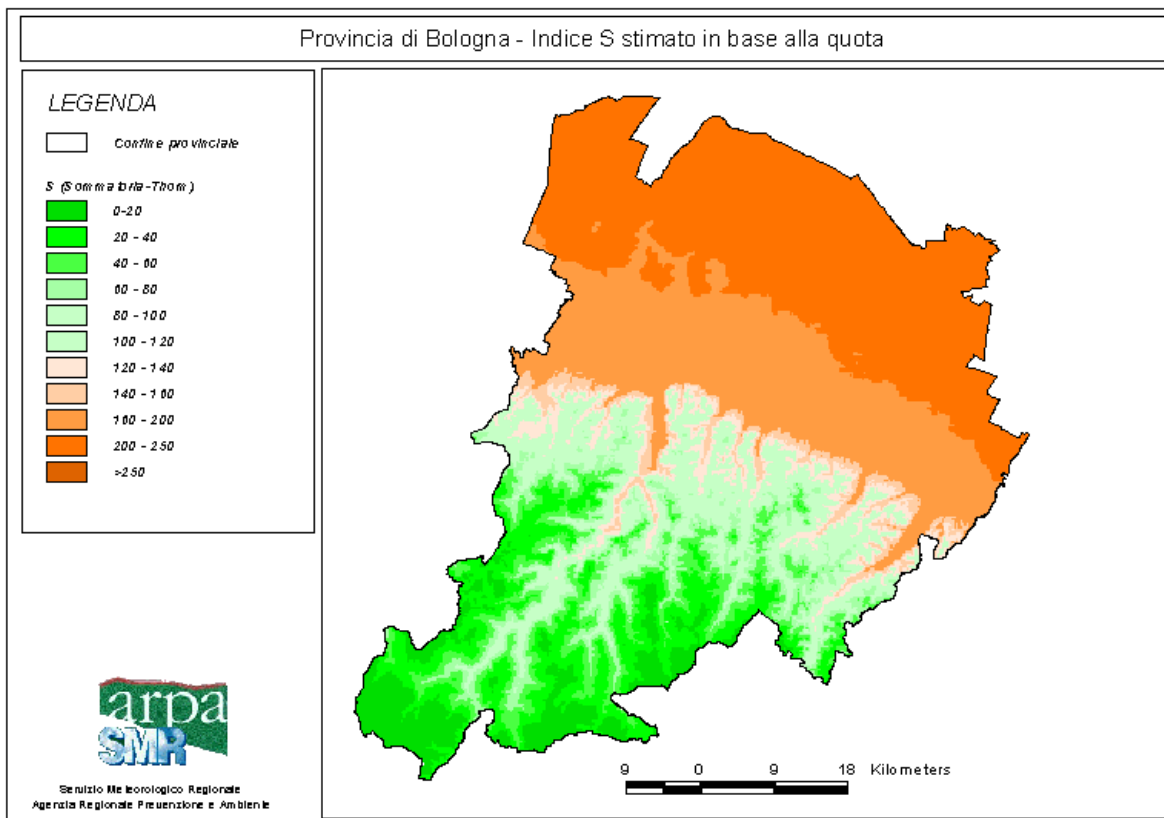


Fig. 2 – Mappa dell'indice di disagio S stimato con la quota.

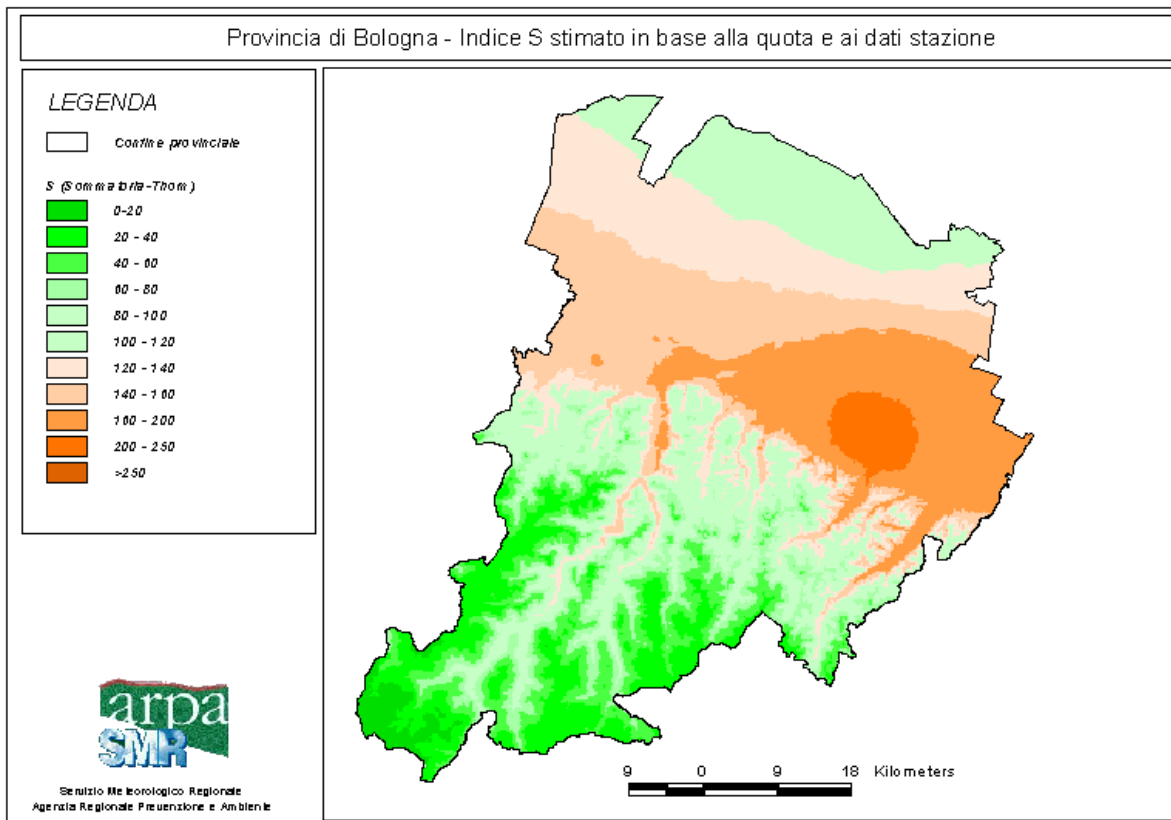


Fig. 3 – Mappa dell'indice di disagio S stimato in base alla quota e ai dati stazione.

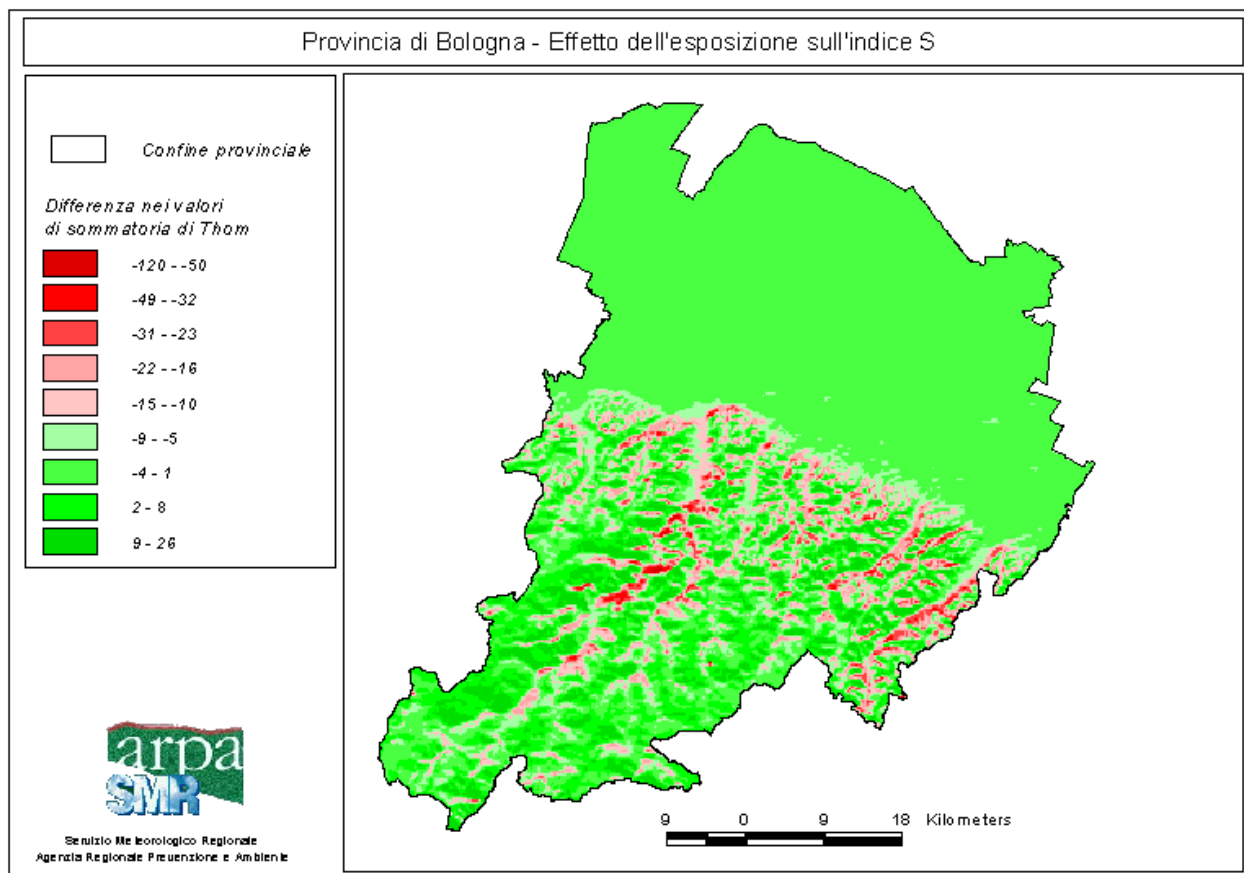


Fig. 4 – Mappa dell'effetto dell'esposizione (espresso come differenza) sull'indice di disagio S stimato in base alla quota e ai dati stazione.

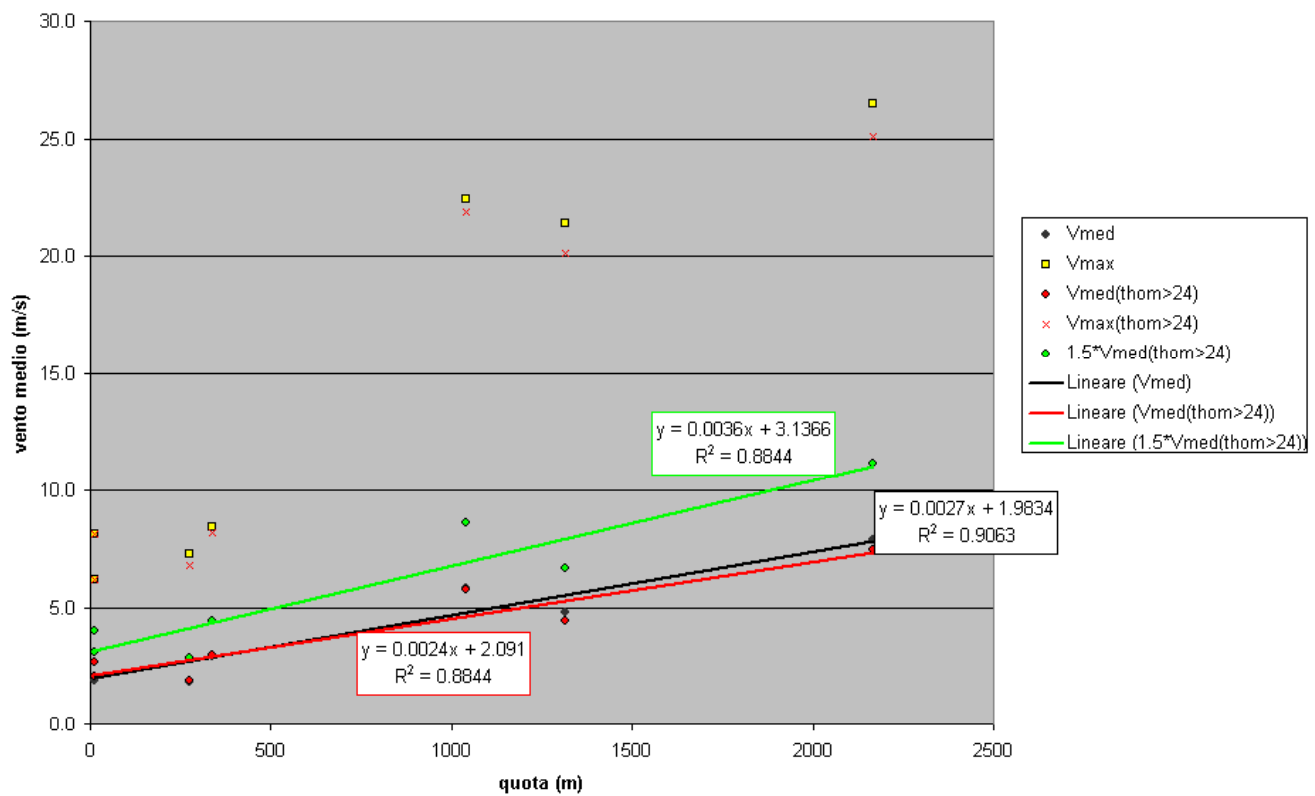


Fig. 5 – Relazione tra vento medio e quota.

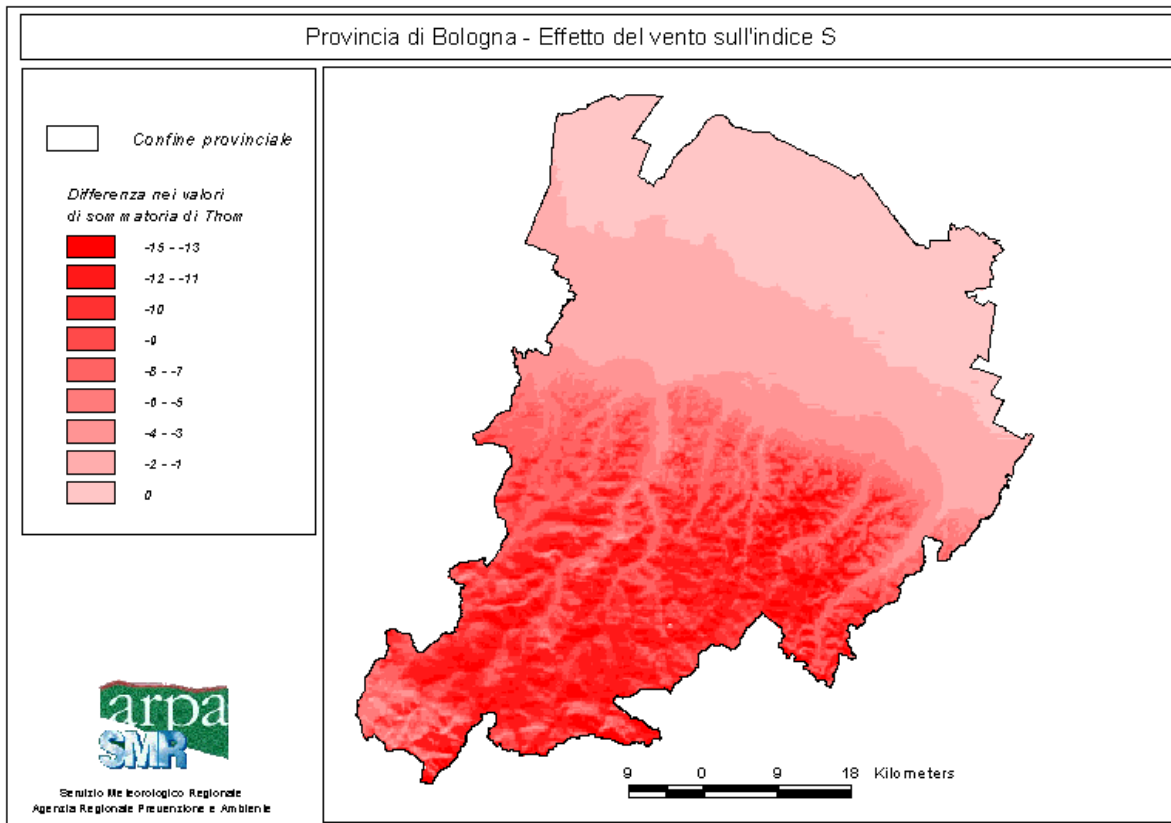


Fig. 6 – Mappa dell'effetto del vento (espresso come differenza) sull'indice di disagio S stimato in base alla quota e ai dati stazione.

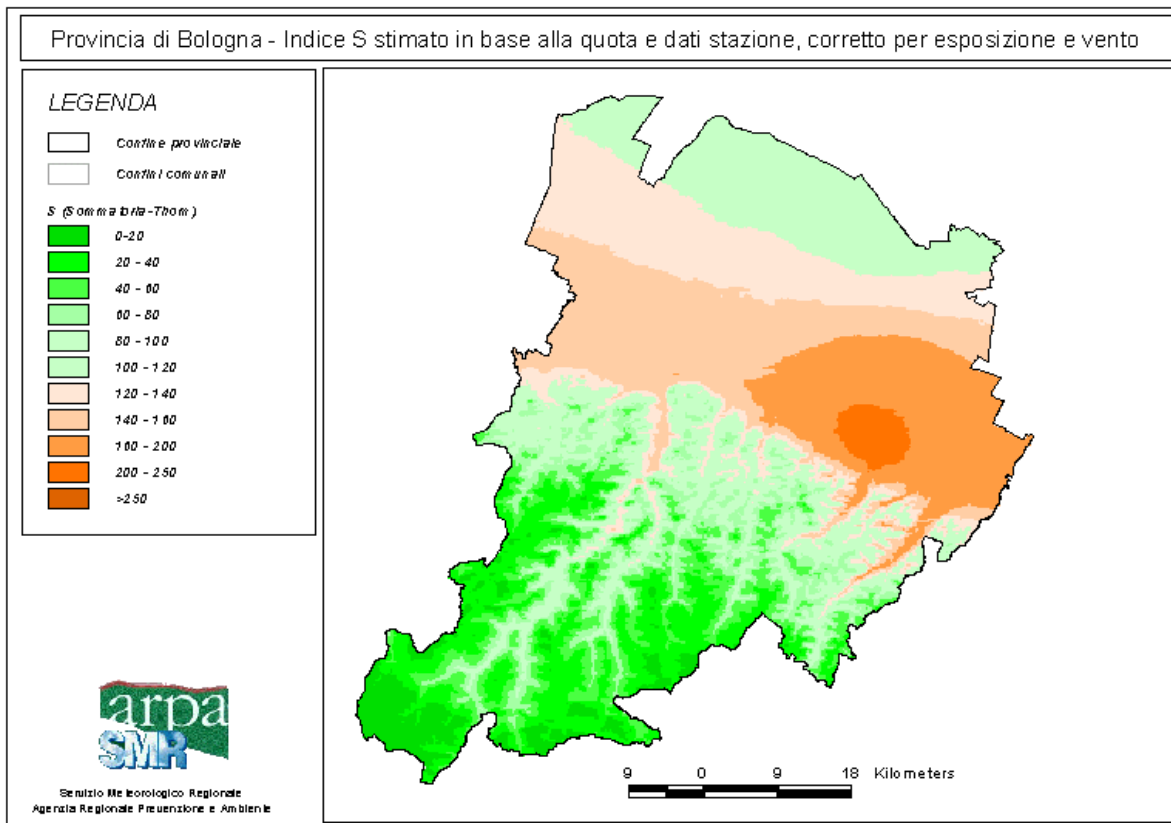


Fig. 7 – Mappa dell'indice di disagio S stimato in base alla quota e ai dati stazione, corretto per esposizione e vento.

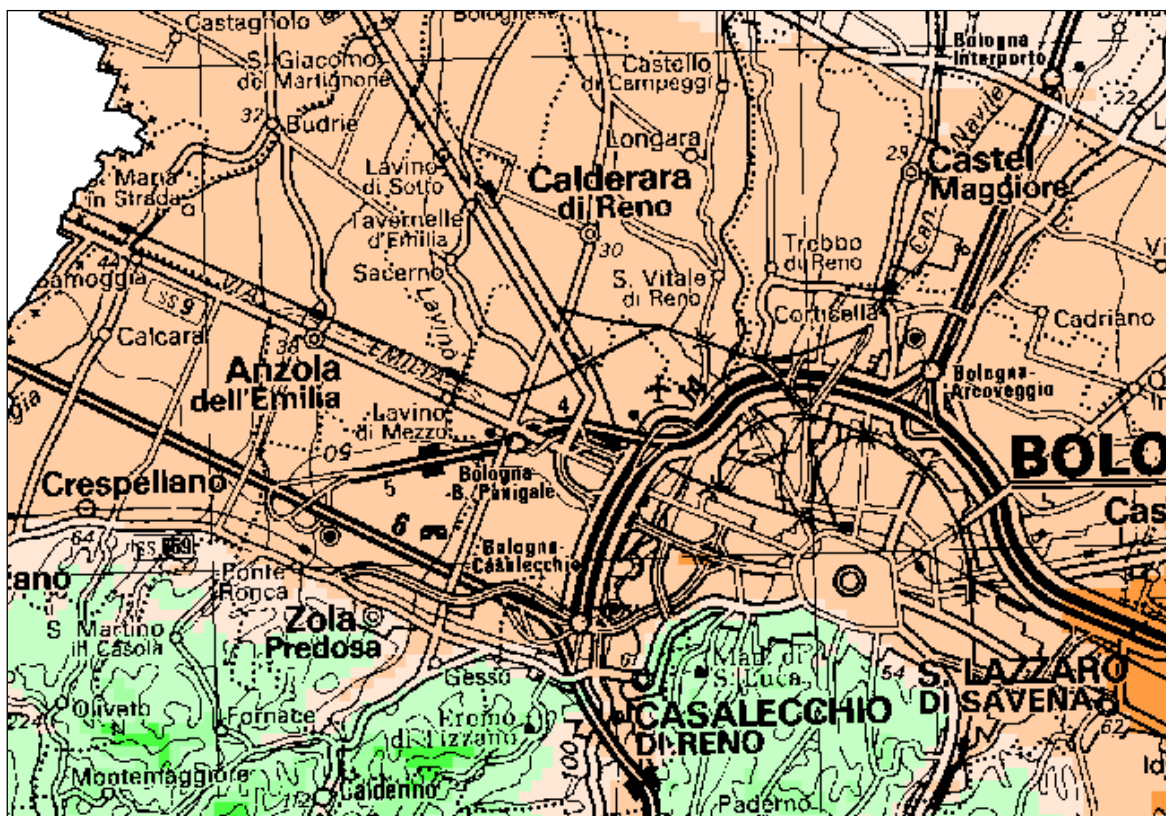


Fig. 8a – Dettaglio della mappa finale dell'indice di disagio S.

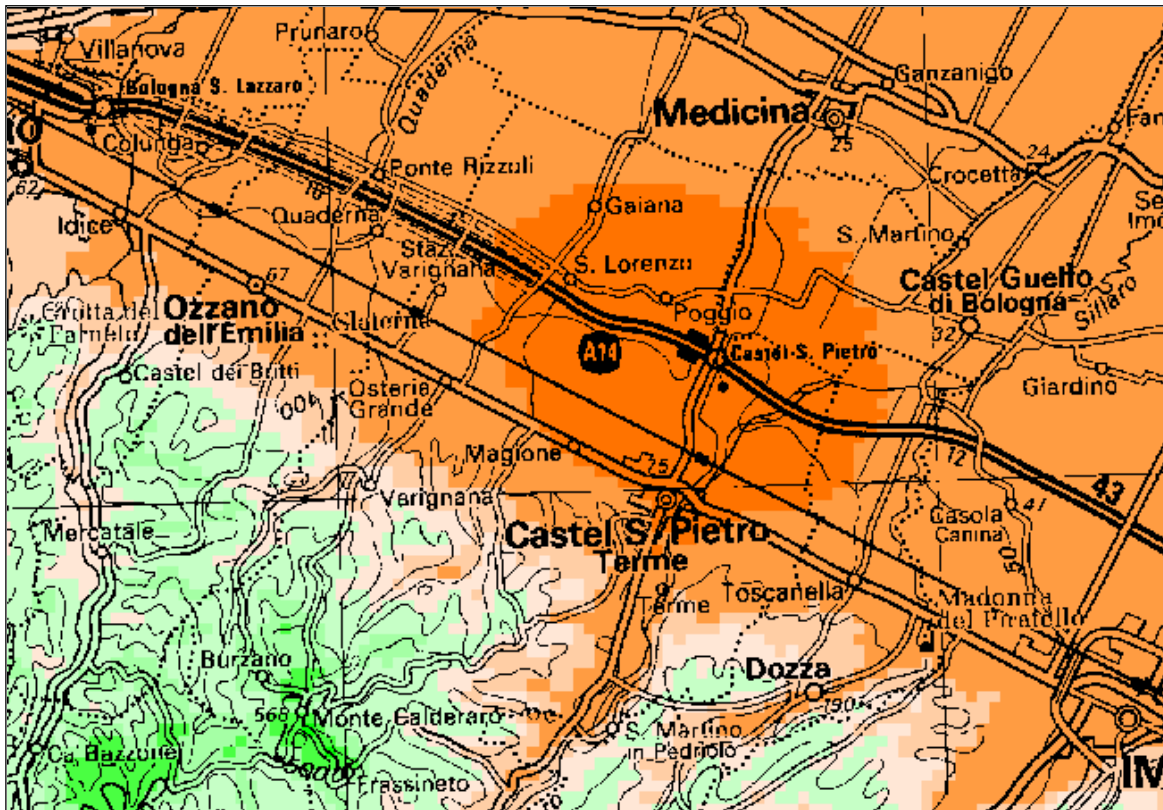


Fig. 8b – Dettaglio della mappa finale dell'indice di disagio S.

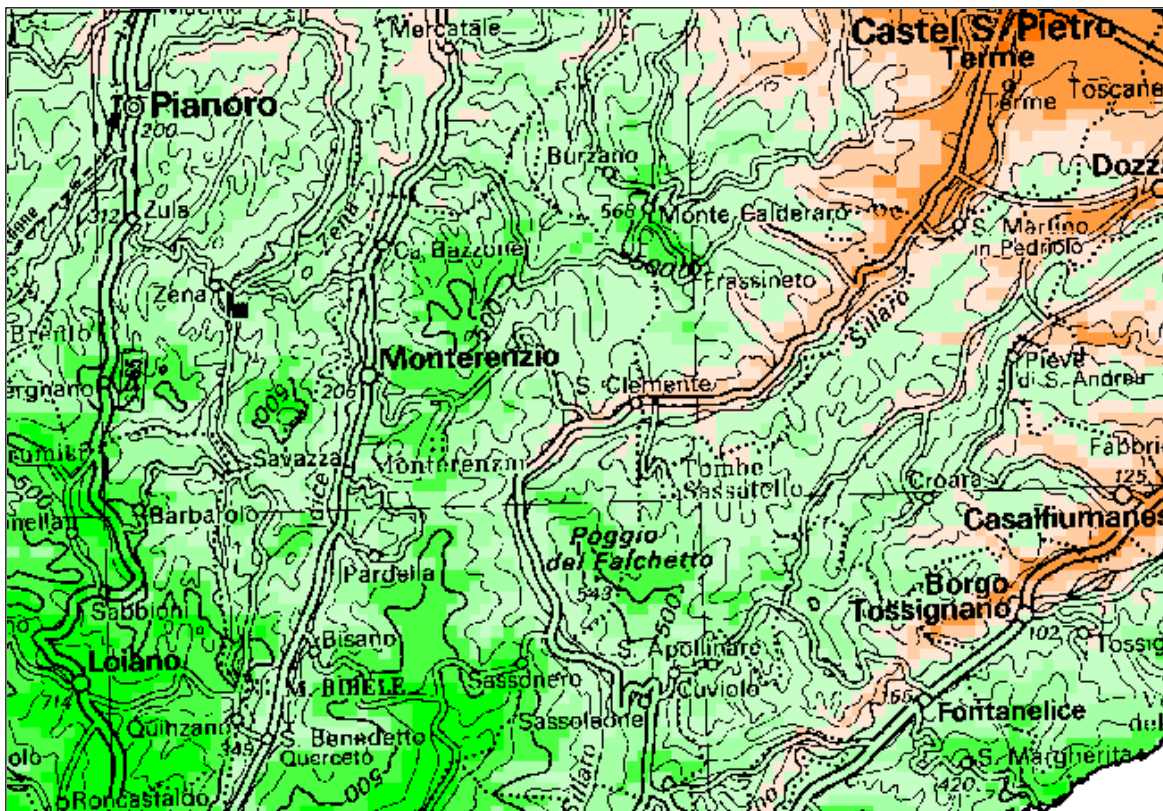


Fig. 8c – Dettaglio della mappa finale dell'indice di disagio S.

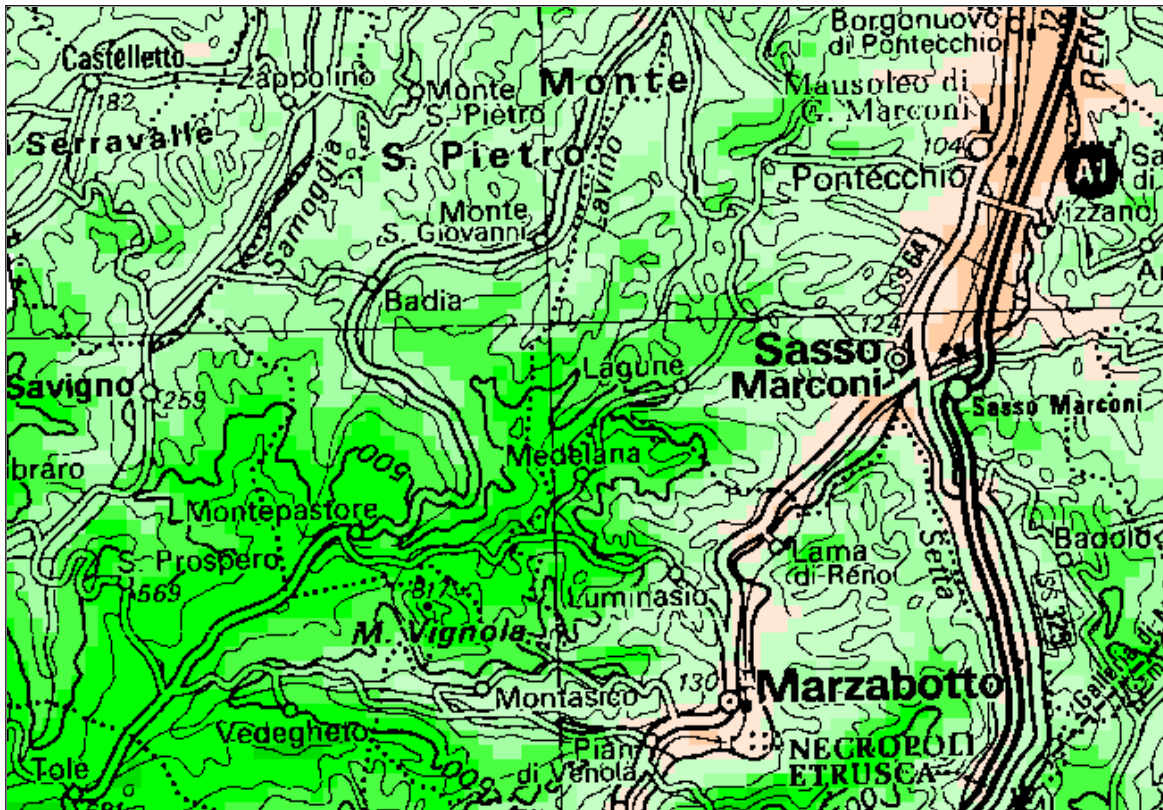


Fig. 8d – Dettaglio della mappa finale dell'indice di disagio S.

APPENDICE – INDICI DI DISAGIO BIOCLIMATICO

Indice di Scharlau

Scharlau K.; 1950. *Einführung eines Schwülemasstabes und Abgrenzung von Schwülezone durch Isohygrothermen, Erdkunde, v.4, pp.188-201.*

Questo autore ha definito sperimentalmente, in assenza di vento, le temperature limite dell'aria, in relazione all'umidità atmosferica, oltre le quali l'organismo di un uomo medio e sano accusa disagio. Tali valori, tracciati su un diagramma cartesiano, definiscono una curva, detta di Scharlau.

I parametri meteorologici presi in considerazione sono quindi:

- 1) l'umidità relativa (%);
- 2) la temperatura dell'aria (°C).

A quest'autore si deve la realizzazione di due tabelle specifiche, una valida per il disagio climatico invernale e l'altra per il disagio climatico estivo.

Attraverso la combinazione dei due parametri meteorologici considerati, tali tabelle consentono di determinare l'esistenza o meno di un disagio fisiologico.

Tabella valida per il disagio climatico invernale, cioè condizioni di freddo-umido.

Valori limite umidità-temperatura per le condizioni ambientali di freddo umido in assenza di vento efficace											
UR (%)	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40
Tc (°C)	3.5	2.8	2.2	1.8	1.5	0.5	0.0	- 0.3	- 0.5	- 1.5	- 2.5

In questa tabella, per ogni valore di umidità relativa, viene indicato il valore limite di temperatura dell'aria al di sotto del quale, in assenza di vento, l'organismo umano prova disagio per la presenza di condizioni igrotermiche sfavorevoli.

L'indice di Scharlau per il disagio invernale è valido solo per valori di umidità relativa superiori al 40 % ed è sensibile in un intervallo di temperatura compreso tra -6°C e 5°C. Al di fuori di tale intervallo, anche al variare dell'umidità relativa, l'indice attribuisce sempre i valori estremi della classificazione, cioè "benessere" per temperature superiori a 5°C e "disagio intenso" per temperature inferiori a -6°C.

Questo indice è periodicamente applicato dal Servizio Meteorologico Regionale (S.M.R.) dell'Emilia Romagna.

Per poter ricavare anche i valori intermedi della tabella e per rendere la stessa applicabile in modo automatico ad un elevato numero di dati, può essere utilizzata la seguente equazione:

$$Tc = (- 0.0003 * UR^2) + (0.1497 * UR) - 7.7133$$
$$R^2 = 0.9848$$

UR = umidità relativa

Tc = temperatura critica

La differenza tra la temperatura realmente rilevata dal sensore della stazione meteorologica, quindi la temperatura locale, e la temperatura critica (Tc), individua un ET che può essere:

positivo: la temperatura rilevata è superiore alla temperatura critica, quindi non si ha disagio;

negativo: la temperatura rilevata è inferiore alla temperatura critica, quindi si ha disagio, la cui intensità (debole, moderata o intensa) dipenderà dall'ampiezza del ET stesso.

Tabella valida per il disagio climatico estivo, cioè condizioni di caldo-umido.

Valori limite umidità-temperatura per le condizioni ambientali di caldo umido in assenza di vento efficace															
UR (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
Tc (°C)	15.5	17.3	18.2	19.1	20.1	21.1	22.2	23.4	24.8	25.2	28.0	30.1	32.2	34.8	35.5

In questa tabella, per ogni valore di umidità relativa, viene indicata la temperatura limite oltre la quale cessa lo stato di benessere e si entra nelle condizioni di caldo umido.

L'indice di Scharlau per il disagio estivo è valido solo per valori di umidità relativa superiori al 30 % ed è sensibile in un intervallo termico compreso tra 17° e 39°C. Al di fuori di tale intervallo, anche al variare dell'umidità relativa, l'indice attribuisce sempre la condizione fisiologica alle classi estreme, cioè "benessere" per temperature inferiori a 17°C e "disagio intenso" per temperature superiori a 39°C. Come per la tabella valida per il disagio climatico invernale, anche in questo caso, il calcolo può essere automatizzato mediante l'applicazione della seguente equazione logaritmica:

$$T_c = (- 17.089 * \ln (UR)) + 94.979$$

$$R^2 = 0.9985$$

UR = umidità relativa

Tc = temperatura critica

La differenza tra la temperatura critica (Tc) e la temperatura locale, individua un ET che può essere:

positivo: la temperatura rilevata non supera la temperatura critica, quindi non si ha disagio;

negativo: la temperatura rilevata supera la temperatura critica, quindi si ha disagio, la cui intensità (debole, moderata o intensa) dipenderà dall'ampiezza di questo ΔT.

Sia nel caso della tabella valida per il disagio climatico estivo che per quella invernale, vengono individuate delle soglie di disagio, collegate al valore del ΔT:

CLASSE INDICE SCHARLAU (IS)	DESCRIZIONE
IS ≥ 0	Benessere
- 1 < IS < 0	Disagio debole
- 3 < IS ≤ - 1	Disagio moderato
IS ≤ - 3	Disagio intenso

Indice di Thom

Thom E.C. and Bosen J.F.; 1959. The discomfort index. Weatherwise, 12: 57-60.

L'indice di disagio proposto da Thom, "Discomfort Index" (DI), è considerato uno dei migliori indici di stima della temperatura effettiva. Quest'ultima è definita come "un indice arbitrario" che combina, in un singolo valore, l'effetto di temperatura, umidità e movimento dell'aria sulla sensazione di caldo o freddo percepito dal corpo umano. La temperatura effettiva tiene conto della temperatura di bulbo umido e della temperatura di bulbo asciutto di posti ombreggiati e protetti dal vento.

Questo indice è adatto per descrivere le condizioni di disagio fisiologico dovute al caldo-umido ed è sensibile in un intervallo termico compreso tra 21°C e 47°C. Al di fuori di tale intervallo, anche al variare dell'umidità relativa, l'indice attribuisce sempre la condizione fisiologica alle classi estreme, cioè "benessere" per temperature inferiori a 21°C e "stato di emergenza medica" per temperature superiori a 47°C.

Durante l'estate è abitualmente utilizzato dal Servizio Meteorologico Regionale dell'Emilia Romagna. L'indice è calcolato mediante la seguente equazione lineare:

$$DI = 0.4 * (Ta + Tw) + 4.8$$

Ta = temperatura di bulbo asciutto (°C);

Tw = temperatura di bulbo umido (°C).

Confrontando il valore di DI (°C), ottenuto dall'applicazione della formula, con i valori soglia riportati nella tabella di classificazione dell'indice, viene individuato il livello di disagio.

DESCRIZIONE	CLASSI
Benessere	DI < 21
Meno del 50% della popolazione prova un leggero disagio	21 <= DI < 24
Oltre il 50% della popolazione prova un crescente disagio	24 <= DI < 27
La maggioranza della popolazione prova disagio e un significativo deterioramento delle condizioni psicofisiche	27 <= DI < 29
Tutti provano un forte disagio	29 <= DI < 32
Stato di emergenza medica, il disagio è molto forte, il rischio di colpi di calore è pericoloso ed elevato	DI >= 32

Indice termoigrometrico

Kyle W.J.; 1994. The human bioclimate of Hong Kong. In Brazdil R, Kolář M (eds) Proceedings of the Contemporary Climatology Conference, Brno. TISK LITERA, Brno., pp 345-350.

Questo indice, il Thermohygrometric Index (THI), è un sistema per calcolare approssimativamente il valore dell'indice di disagio di Thom, usando direttamente, oltre alla temperatura dell'aria, l'umidità relativa; evitando quindi il calcolo della temperatura di bulbo umido.

La formula impiegata per determinare questo indice è la seguente:

$$THI (°C) = Ta - (0.55 - 0.0055 * UR) * (Ta - 14.5)$$

Ta = temperatura dell'aria (°C);

UR = umidità relativa (%).

Il THI, a differenza dell'indice di Thom, è un indice principalmente di classificazione climatica, valido sia per periodi caldi che estremamente freddi.

E', inoltre, interessante notare che con temperature superiori a 46°C, anche al variare dell'umidità relativa, l'indice individua sempre la classe estrema, cioè "torrido".

Nella tabella seguente sono riportate le temperature soglia con le relative categorie bioclimatiche.

CATEGORIE THI	THI (°C)
Iperglaciale	≤ -40
Glaciale	$-40 < \text{THI} \leq -20$
Estremamente freddo	$-20 < \text{THI} \leq -10$
Molto freddo	$-10 < \text{THI} \leq -1.8$
Freddo	$-1.8 < \text{THI} < +13$
Fresco	$+13 \leq \text{THI} < +15$
Confortevole	$+15 \leq \text{THI} < +20$
Caldo	$+20 \leq \text{THI} < +26.5$
Molto caldo	$+26.5 \leq \text{THI} < +30$
Torrido	$\text{THI} \geq +30$

Indice di tensione relativa

Kyle W.J.; 1992. Summer and winter patterns of human thermal stress in Hong Kong. In: Kyle W.J. and Chang C.P. (eds.). Proc. Of the 2nd Int. Conference on East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate, Hong Kong. World Scientific, Hong Kong, 557-583.

Il "Relative Strain Index" (RSI) , è un indice adatto per descrivere le condizioni di stress dovute al calore.

Quindi, alle nostre latitudini, è applicato al periodo estivo.

Questo indice è stato sviluppato prendendo come modello di riferimento un uomo medio, seduto, vestito in abito completo da lavoro, in buone condizioni di salute, di 25 anni e non acclimatato al calore.

L'Indice di Tensione Relativa prende in considerazione la temperatura dell'aria (°C) e la pressione di vapore dell'aria (hPa) secondo la seguente equazione:

$$\text{RSI} = (T_a - 21) / (58 - e)$$

T_a = temperatura dell'aria (°C);

e = pressione di vapore dell'aria (hPa).

La pressione di vapore dell'aria, non misurata direttamente nelle stazioni meteorologiche, può essere calcolata a partire dai valori di T_a e UR.

Tale indice è applicabile solo quando la temperatura dell'aria è inferiore o uguale a 35°C.

E', inoltre, importante osservare che con temperature inferiori a 26°C, anche al variare dell'umidità relativa, l'indice individua sempre la classe estrema, cioè "conforto".

Nella tabella sottostante sono riportati i valori soglia dell'RSI con la corrispondente descrizione delle condizioni di disagio.

CLASSIFICAZIONE RSI	CLASSE RSI
Conforto	≤ 0.15
Il 25 % delle persone sono a disagio	$0.15 < \text{RSI} \leq 0.20$
Tutti provano disagio	$0.25 < \text{RSI} \leq 0.35$
Il 75 % delle persone sono fortemente a disagio	$0.35 < \text{RSI} \leq 0.45$
Il 100 % delle persone sono fortemente a disagio	$\text{RSI} > 0.45$

Nel caso di persone anziane e per individui ammalati, il valore di RSI uguale a 0.20 rappresenta la soglia oltre la quale essi possono essere soggetti a colpi di calore.

Indice di calore

Steadman R.G.; 1979. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. J. Applied Meteorol., Vol 18: 861-873.

L'Indice di Calore, "Heat Index" (HI) o "Apparent Temperature" (AT), è un indice, calcolato in gradi Fahrenheit (°F), che permette di stimare il disagio fisiologico dovuto alla esposizione a condizioni meteorologiche caratterizzate da alte temperature ed elevati livelli igroscopici dell'aria.

Siccome per poter applicare la formula è richiesta la temperatura in °F, è necessario trasformare i valori della temperatura da °C in °F:

$$T_a(^{\circ}\text{F}) = (9 / 5) * T_a(^{\circ}\text{C}) + 32$$

L'equazione usata per la determinazione dell'Indice di Calore è valida solo per temperature uguali o superiori a 80°F (27°C) ed umidità relativa uguale o maggiore al 40%. Inoltre, è importante osservare che, con temperature superiori a 42°C, anche al variare dell'umidità relativa, l'indice attribuisce la condizione esaminata sempre alla classe estrema, cioè "elevato pericolo".

Tale equazione fu derivata, attraverso un'analisi di regressioni multiple, da uno studio condotto e pubblicato da R.G. Steadman nel 1979, volto a descrivere il fenomeno del "caldo afoso", inteso come gli effetti di temperatura ed umidità relativa sull'uomo a livello del mare.

$$\text{HI} = -42.379 + 2.04901523 * T_a + 10.1433127 * \text{UR} - 0.22475541 * T_a * \text{UR} - 5.83783 * (10^{-3}) * (T_a^2) - 5.481717 * (10^{-2}) * (\text{UR}^2) + 1.22874 * (10^{-3}) * (T_a^2) * \text{UR} + 8.5282 * (10^{-4}) * T_a * (\text{UR}^2) - 1.99 * (10^{-6}) * (T_a^2) * (\text{UR}^2)$$

T_a = temperatura dell'aria (°F);

UR = umidità relativa (%).

I parametri coinvolti nel complesso calcolo per ottenere questa equazione, oltre alla temperatura e all'umidità relativa dell'aria, furono:

pressione di vapore;

velocità effettiva del vento;

dimensioni di un uomo;
 temperatura interna del corpo di un uomo;
 tasso di sudorazione di un uomo.

L'Indice di Calore viene impiegato abitualmente negli Stati Uniti d'America, dal National Weather Service della NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), per valutare il disagio termico durante l'estate, periodo in cui il calore e la radiazione solare rappresentano un serio problema nazionale.

Quando l'Indice di Calore supera per almeno due giorni consecutivi i 105°F – 110°F (41°C – 43°C), il Servizio Meteorologico Nazionale avvia una procedura di allerta per la popolazione americana.

Tale procedura di allerta consiste nel:

1. divulgare uno speciale comunicato sul tempo e/o un comunicato di pubblica informazione, riportando dettagliatamente i valori dell'Indice di Calore;
2. segnalare quali soggetti sono più a rischio, nonché le norme di sicurezza più adatte per ridurre il pericolo;
3. indicare i Presidi sanitari locali e, nel caso di pericolose ondate di calore, assistere il personale delle strutture sanitarie.

L'informazione meteorologica, da parte di comunicati speciali sul tempo, comprenderà anche utili informazioni mediche, avvisi, nonché nomi e numeri di telefono delle strutture sanitarie locali.

Grazie alla ricerca, in seguito alle ultime scoperte, il National Weather Service ha classificato l'Indice di Calore in quattro categorie, riportando anche i possibili disturbi cui possono andare soggetti soprattutto le persone più deboli, come i malati, gli anziani e i bambini.

Categoria	Indice di calore (HI)	Possibili disturbi da calore per persone che rientrano nelle categorie ad elevato rischio
Cautela	80°F (27°C) <= HI < 89°F (32°C)	Possibile stanchezza in seguito a prolungata esposizione al sole e/o attività fisica
Estrema cautela	90°F (32°C) <= HI < 104°F (40°C)	Possibile colpo di sole, crampi da calore con prolungata esposizione e/o attività fisica
Pericolo	105°F (41°C) <= HI < 129°F (54°C)	Probabile colpo di sole, crampi da calore o spossatezza da calore, possibile colpo di calore con prolungata esposizione al sole e/o attività fisica
Elevato pericolo	HI >= 130°F (54°C)	Elevata probabilità di colpo di calore o colpo di sole in seguito a continua esposizione

New summer Simmer index

Pepi W.J.; 1987. The Summer Simmer Index, Weatherwise, Vol 40, No. 3, June.

Pepi W.J.; 2000. The New Summer Simmer Index. International audience at the 80th annual meeting of the AMS at Long Beach, California, on January 11.

Questo recentissimo indice di benessere, presentato all'ottantesimo meeting dell'AMS tenutosi a Long Beach, in California, 11 Gennaio 2000, rappresenta una nuova versione del Summer Simmer Index, pubblicato nel 1987 in una edizione estiva del Weatherwise, ad opera di John W. Pepi.

Si tratta di un indice adatto a descrivere le condizioni di stress da calore durante la stagione calda.

Questo indice utilizza i risultati provenienti da modelli fisiologici e test umani effettuati su un periodo di oltre 75 anni dalla Società Americana di Ingegneria del Riscaldamento e Refrigerazione (ASHRAE) presso l'Università del Kansas State.

E' un indice rappresentativo e significativo in quanto:

- è testato fisiologicamente;
- è sostenuto da obiettive leggi scientifiche;
- è confermato da test soggettivi;
- è un indicatore del benessere e del disagio (non esprime semplicemente una sensazione termica).

Come nel caso dell'equazione per determinare l'Indice di Calore, anche nell'equazione utilizzata per calcolare il SSI è richiesta la temperatura in °F. E' quindi necessario trasformare i valori della temperatura da °C in °F applicando la seguente formula:

$$Ta(^{\circ}F) = (9 / 5) * Ta(^{\circ}C) + 32$$

A questo punto è possibile applicare la formula per la determinazione del valore dell'indice, da confrontare con i valori soglia dello stesso, corrispondenti a differenti livelli di disagio.

$$SSI = 1.98 * (Ta - (0.55 - 0.0055 * (UR)) * (Ta - 58)) - 56.83$$

Ta = temperatura dell'aria (°F);

UR = umidità relativa (%).

Tale indice è applicabile quando la temperatura è superiore o uguale a 22°C ed è sensibile fino ad una temperatura di 53°C, oltre la quale, anche variando l'umidità relativa, l'indice individua sempre il valore massimo della classificazione, cioè "estremamente caldo".

CATEGORIE	NEW SUMMER SIMMER INDEX (°F)	EFFETTI
LEggermente FRESCO	70 <= SSI < 77	La maggior parte delle persone sono a proprio agio anche se è leggermente fresco
CONFORTEVOLE	77 <= SSI < 83	Quasi tutti sono in condizioni confortevoli
LEggermente CALDO	83 <= SSI < 91	La maggior parte delle persone sono a proprio agio anche se è leggermente caldo
CALDO	91 <= SSI < 100	Si avverte un aumento del disagio
MEDIAMENTE CALDO	100 <= SSI < 112	Disagio significativo. Esiste il pericolo di colpo di sole e spossatezza da calore in seguito a prolungata esposizione al sole e/o attività fisica
MOLTO CALDO	112 <= SSI < 125	Disagio elevato. Tutti sono a disagio. Esiste il pericolo di colpo di calore

ESTREMAMENTE CALDO	$125 \leq \text{SSI} < 150$	Disagio massimo. Elevato pericolo di colpo di calore, soprattutto per le persone più deboli, gli anziani e anche i bambini più piccoli
--------------------	-----------------------------	--

Indice Humidex

Masterton J.M, Richardson F.A.; 1979. Humidex, a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity, CLI 1-79. Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario.

E' uno degli indici utilizzati per valutare il benessere climatico dell'uomo in relazione all'umidità ed alla temperatura.

I primi studi sono stati effettuati nel 1965 in Canada, ma solo successivamente, alcuni meteorologi canadesi, hanno individuato una scala, chiamata appunto Humidex, la quale cerca, considerando la temperatura dell'aria e l'umidità relativa, di calcolare un singolo valore in grado di descrivere il disagio, per l'uomo, che si verifica in giorni umidi e caldi.

Tale indice si basa su di una semplice relazione empirica che prende in considerazione la temperatura dell'aria e la tensione di vapore.

$$H = T_a + (0.5555 * (e - 10))$$

T_a = temperatura dell'aria (°C);

e = pressione di vapore (hPa).

Quindi, questo indice biometeorologico, per poter essere applicato, richiede la conoscenza, oltre che della temperatura dell'aria, anche di un parametro non rilevato direttamente dai sensori delle stazioni meteorologiche, cioè la pressione di vapore dell'aria (e).

L'equazione che consente di calcolare l'indice Humidex (H), individua diversi gradi di stress da calore descritti nella seguente tabella.

CATEGORIE	HUMIDEX (°C)	EFFETTI
Benessere	$H < 27$	Tutti sono a proprio agio
Cautela	$27 \leq H < 30$	Leggero disagio. Possibile affaticamento in seguito a prolungata esposizione al sole e/o attività fisica
Estrema cautela	$30 \leq H < 40$	Disagio. Possibile colpo di calore, possibile spossatezza e crampi da calore in seguito a prolungata esposizione al sole e/o attività fisica
Pericolo	$40 \leq H < 55$	Grande disagio. Evitare sforzi.

		Cercare un luogo fresco ed in ombra. Probabili crampi o spossatezza da calore. Possibile colpo di calore in seguito a prolungata esposizione al sole e/o attività fisica
Elevato pericolo	$H \geq 55$	Imminente colpo di calore in seguito a prolungata esposizione al sole

E' importante osservare che tale indice è sensibile in un intervallo di temperatura compreso tra 20° e 55°C. Al di fuori di tale intervallo, anche al variare dell'umidità relativa, l'indice individua sempre le classi estreme, cioè "benessere" per temperature inferiori a 20°C ed "elevato pericolo" per temperature superiori a 55°C.

Indice di temperatura equivalente

Bründl W. and Höppe P.; 1984. Advantage and disadvantage of the Urban Heat Island. An evaluation according to the hygro-thermic effects. Arch. Met. Geoph. Biocl., Ser. B 35, 55-66.

Tale indice è adatto a individuare condizioni di benessere o disagio termico in un ampio range di condizioni climatiche.

La temperatura equivalente corrisponde alla temperatura che una massa d'aria, tenuta a pressione costante, assumerebbe se il vapor acqueo in essa contenuto condensasse e se il calore latente di condensazione liberato fosse usato per aumentare la sua temperatura. La temperatura equivalente, quindi, non è altro che la temperatura effettiva dell'aria aumentata del calore latente di condensazione di tutto il vapore acqueo contenuto nell'aria stessa. Viene espressa in °C ed è costante nei processi umidoadiabatici (movimenti ascendenti e discendenti dell'aria satura senza scambio di calore con l'esterno).

L'equazione empirica impiegata per il calcolo dell'indice di temperatura equivalente (Teq), impiega, oltre alla temperatura dell'aria, altri diversi parametri.

$$Teq = Ta + m \cdot (r - 2.326 \cdot Ta) / (cp + m \cdot cw)$$

Ta = temperatura dell'aria ambiente (°C);

r = calore latente di vaporizzazione dell'acqua (cal g⁻¹), pari a 585 cal g⁻¹;

m = rapporto di mescolanza, cioè il rapporto tra la massa del vapor d'acqua e la massa dell'aria asciutta (g Kg⁻¹);

cp = calore specifico dell'aria a pressione costante (cal °C g⁻¹), pari a 0.24 cal °C g⁻¹;

cw = calore specifico dell'acqua (cal °C g⁻¹), pari a 1 cal °C g⁻¹.

Questo indice, considerando una pressione variabile tra 800 mb e 1100 mb, è sensibile in un intervallo di temperatura compreso tra 20°C e 45°C. E' importante osservare che con temperature superiori a 45°C, anche al variare dell'umidità relativa e della pressione, l'indice individua sempre la classe estrema superiore, cioè "afoso".

Considerando una velocità del vento $v = 1.0$ m/s, sono state individuate cinque classi di temperatura equivalente.

CLASSIFICAZIONE T_{eq}	CLASSI T_{eq}
Fresco	$T_{eq} * 27$
Moderatamente fresco	$27 < T_{eq} * 34$
Benessere	$34 < T_{eq} * 47$
Leggermente afoso	$47 < T_{eq} * 51$
Afoso	$T_{eq} > 51$

Indice Wind Chill

Siple P.A., Passel C.F.; 1945. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures, Proc. Amer. Phill. Soc., 89: 177 - 199.

L'origine di questo indice risale a un esperimento condotto in Antartide nell'inverno del 1941 da Paul Siple e Charles Passel. Questi ricercatori misurarono il tempo che un panno umido impiegava per congelare e trovarono che dipendeva dalla velocità del vento.

Ovviamente il discorso per un essere umano è ben più complesso di un panno umido, in quanto sono diversi i fattori che influenzano la sensibilità alla temperatura, come ad esempio l'età, la corporatura, lo stato di salute.

Ciononostante, questo indice può comunque essere impiegato per descrivere quale sia la reale temperatura avvertita da un organismo umano in relazione alla temperatura dell'aria e alla velocità del vento.

Il vento, accrescendo l'evaporazione, aumenta, di conseguenza, l'asportazione di calore corporeo e, in presenza di basse temperature, crea condizioni di forte disagio da freddo.

L'Indice Wind Chill esprime la capacità di togliere calore al corpo umano, quindi, è una misura del tasso di calore perso dal corpo.

Per il calcolo di questo indice viene impiegata una equazione empirica che tiene conto della temperatura dell'aria e della velocità del vento.

$$wc = (33 + (T_a - 33) * (0.474 + 0.454 * \sqrt{v} - 0.0454 * v))$$

T_a = temperatura dell'aria (°C):

v = velocità del vento (m/s).

Tale indice è applicabile quando la velocità del vento è compresa tra 2 m/s e 24 m/s e quando la temperatura è inferiore a 11°C.

Ad ogni classe dell'indice corrispondono determinati effetti sull'organismo umano.

CLASSI DI WIND CHILL (°C)	EFFETTI SULL'ORGANISMO UMANO
$WC > +10$	Nessun particolare disagio
$+10 \geq WC > -1$	Condizioni di lieve disagio
$-1 \geq WC > -10$	Condizioni di disagio

-10 \geq WC $>$ -18	Molto freddo
-18 \geq WC $>$ -29	Possibile congelamento in seguito ad esposizione prolungata
-29 \geq WC $>$ -50	Congelamento in seguito ad esposizione prolungata
WC * -50	Rapido congelamento per esposizioni superiori a 30 secondi