

STIMA DEI GRADI-GIORNO PER LA VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO ENERGETICO NAZIONALE NEI PROSSIMI DECENNI

Paola Faggian, Giuseppe Maurizio Riva, Riccardo Bonanno

RSE – Ricerca per il Sistema Energetico, Milano.

Sommario – Il fabbisogno energetico per riscaldamento/raffreddamento è fortemente legato alle condizioni meteorologiche, con i picchi di domanda correlati ai valori estremi di temperatura. Per la sua stima si utilizzano gli indici “gradi-giorno” (DD) per riscaldamento e raffrescamento, definiti come differenza tra la *temperatura-base* (temperatura di comfort rispetto alla quale la richiesta energetica è minima) e la temperatura esterna media giornaliera. Convenzionalmente, i due indici si calcolano su base annuale (HDD e CDD rispettivamente), sommando tali differenze per tutti i giorni dell’anno. Utilizzando i campi di temperatura media giornaliera forniti da due data-set di riferimento (E-OBS 1961-2016 e MESAN 1979-2013) e da 10 simulazioni modellistiche (Progetto ENSEMBLES, 1961-2050), sono stati stimati i gradi-giorno per l’Italia, nelle condizioni attuali e future, applicando due algoritmi: JRC/MARS (*J*) e Giannakopoulos (*G*). Il primo criterio è stato considerato perché di riferimento europeo, il secondo perché adottato nel Progetto Europeo ENSEMBLES. Come atteso, si ottengono stime sostanzialmente diverse (i valori dedotti da *G* risultano considerevolmente più bassi rispetto alle stime *J*) per effetto dell’uso di valori diversi di *temperature base*. Essendo il fabbisogno energetico correlato alle volumetrie di edificato termoregolate, il calcolo dei gradi-giorno medi nazionali è stato affinato valutando i DD medi nazionali pesati con la distribuzione della popolazione sul territorio quale variabile proxy della distribuzione spaziale dei fabbisogni energetici. Le stime HDD sono risultate sensibilmente ridotte (~20%) rispetto a quelle ottenute come semplice media delle temperature, mentre i valori CDD sono risultati leggermente superiori o molto simili ai precedenti. Si sono quindi analizzate le variazioni percentuali dei gradi-giorno attesi nei prossimi decenni, secondo le due metodologie. Usando il criterio *J*, le proiezioni indicano una sostanziale riduzione degli HDD (~25% nel 2050) e un significativo aumento dei CDD (~100% nel 2050), coerentemente con l’aumento termico previsto. Applicando *G*, la riduzione degli HDD è circa la stessa, risulta invece più spinto l’aumento dei CDD (~140% a metà del secolo).

Parole chiave: cambiamenti climatici, gradi-giorno, fabbisogno energetico, ensemble-means, proiezioni future.

DEGREE-DAYS ESTIMATION TO EVALUATE THE NATIONAL ENERGY DEMAND IN THE COMING DECADES

Abstract – Energy demand for heating/cooling depends closely on surface temperature variability (with maximum energy requirements correlated to temperature extreme values). In order to estimate it, the indices heating degree-days and cooling degree-days are used. They are defined as the difference between a comfort temperature, called *base-temperature* (with respect to which the energy demand is minimal) and the outside daily mean temperature. Conventionally the degree-days are computed at annual scale (HDD and CDD respectively), by adding such differences for every day of the year. In this study the degree-days have been estimated for Italy in the current climate and in future climate conditions, by using daily temperature values provided by two reference gridded data-sets (E-OBS 1961-2016, MESAN 1979-2013) and 10 ENSEMBLES simulations (1961-2050). Two methodologies have been applied: JRC/MARS (*J*) and Giannakopoulos (*G*). The first has been considered because it is the European reference method, the second one because it has been used in the European Project ENSEMBLES to assess the climate change impacts on the Mediterranean Basin. They differ essentially as they use different base-temperatures. As expected, the results obtained by applying the two methods are substantially different (the *G* degree-days are considerably lower than the *J* estimates). As energy demand is correlated to building volumes, the location of residential buildings has been combined together with the temperature fields in computing the degree-days indexes. The new HDD resulted lower than the first estimate (~20%), whereas the new CDD resulted a bit higher or, at least, similar to those calculated by giving uniform weights to all grid-points. The percentage variations of the degree-day in the next decades have been investigated according to the two methodologies. *J* future projections show a noteworthy HDD reduction (~25% in 2050) and a significant CDD increase (~100%) according with the expected warming. By using *G* method, the HDD reduction is similar to the *J* estimate, instead it is found a sharper increase of CDD (~140% in the middle of the century).

Keywords: climate change, degree-days, energy demand, ensemble means, future projections.

Ricevuto il 9-1-2018. Modifiche sostanziali richieste il 4-5-2018. Correzioni richieste il 3-9-2018. Accettazione il 15-9-2018.

1. INTRODUZIONE

Uno tra i più rilevanti impatti dei cambiamenti climatici (CC) sull’ambiente urbano riguarda la modifica del fabbisogno energetico per riscaldamento

* Per contatti: RSE – Ricerca per il Sistema Energetico, Via Rubattino 54 20134 Milano. Tel. 02.39925152; Fax 02 39924608. E-mail: paola.faggian@rse-web.it.

to e raffrescamento. Nella pubblicazione della Commissione Europea “An EU Strategy on Heating and Cooling” (EC, 2016a), si dichiara che nei Paesi dell’Unione Europea (EU) circa la metà dell’energia è impiegata per il riscaldamento e il raffrescamento di case, uffici, ospedali, scuole e industrie. In particolare, nel 2012 si sono consumati 546 Mtep di energia per riscaldamento e raffrescamento, di cui il 75% è di origine fossile (circa metà dal gas), mentre solo il 18% da sorgenti rinnovabili (Figura 1).

Il settore residenziale consuma il 45% di energia per il riscaldamento e raffrescamento; il 37% è impiegato nell’industria, il 18% nei servizi.

L’elevata richiesta energetica per la climatizzazione degli ambienti evidenzia come il cambiamento climatico possa avere impatti non trascurabili sul consumo energetico e, quindi, sulle emissioni dovute alla combustione di combustibili fossili. Per l’Europa, che ha tra i suoi maggiori obiettivi quello di rispettare gli impegni presi con l’Accordo di Parigi in occasione della COP21, risulta dunque prioritario elaborare un piano di sviluppo teso a rendere più efficiente e sostenibile il riscaldamento e il raffrescamento. In una strategia di decarbonizzazione diventa, pertanto, fondamentale stimare il fabbisogno energetico nazionale associato alla climatizzazione del settore residenziale e, quindi, elaborare degli scenari per i prossimi decenni. Il fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento, oltre che dipendere dalle caratteristiche costruttive e dal grado di isolamento degli edifici, è fortemente legato alle condizioni climatiche del territorio. Esso dipende soprattutto dalla variabilità della temperatura dell’aria nel corso dell’anno (v. per es. Troccoli et al., 2014; Amato et al., 2005), con valori massimi di richiesta energetica correlati ai valori estremi di temperatura (massima e minima). Nella regione mediterranea e, in particolare, nel nostro Paese, i picchi di fabbisogno energetico si verificano:

- nella stagione invernale in concomitanza al periodo natalizio e con l’occorrenza delle temperature più basse (tipicamente in gennaio);
- nella stagione estiva, quando ogni innalzamento termico si traduce in un incremento del consumo elettrico, dovuto principalmente all’uso del condizionamento, soprattutto nelle aree urbane a causa anche dell’effetto “isola di calore” (fa eccezione agosto, mese in cui parte della popolazione è in vacanza).

I due periodi di picco sono intervallati dalle due stagioni di transizione (marzo-maggio e settem-

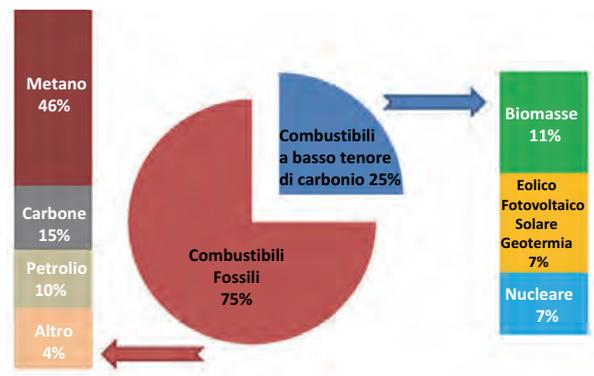


Figura 1 – Consumo energetico in Europa per riscaldamento e raffrescamento nel 2012 (EC, 2016a)

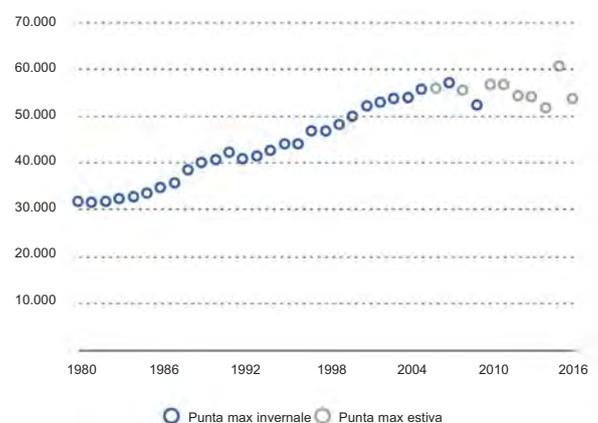


Figura 2 – Carico massimo elettrico annuo in Italia dal 1980 (MW) (Fonte: TERNA, 2018)

bre-novembre), durante le quali la domanda e i consumi di energia rimangono sostanzialmente uniformi.

Se fino al 2006 la punta di fabbisogno nazionale di elettricità era in corrispondenza agli ultimi giorni lavorativi prima di Natale, negli anni successivi la richiesta energetica massima si è spostata nei mesi estivi (Figura 2), anche a causa della recente massiccia diffusione dei sistemi di condizionamento (TERNA, 2018).

Esistono diversi metodi di analisi energetica di diversa complessità (v. per es. Siface et al., 2013). Scapin et al. (2016) citano diversi studi che trattano l’effetto delle variabili meteorologiche sul fabbisogno elettrico nazionale (tra gli altri, De Felice et al., 2013, Marvuglia e Massineo, 2012; Manera e Marzullo, 2005) e, in accordo con altre pubblicazioni scientifiche (v. Ranson et al., 2014 per una rassegna di diversi approcci metodologici) dimostrano, attraverso il loro modello di previsione del fabbisogno elettrico giornaliero, come la tempera-

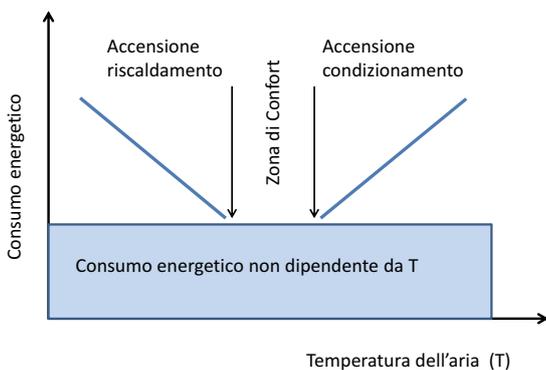


Figura 3 – Dipendenza del consumo energetico dalla temperatura esterna

tura dell'aria sia la variabile meteorologica che più influenza la domanda elettrica.

In effetti, la richiesta energetica sale in estate per il raffrescamento e d'inverno per il riscaldamento delle abitazioni. Invece, il consumo energetico è al minimo quando la temperatura dell'aria è prossima ad un valore di temperatura di confort, detta *temperatura base*, rispetto alla quale non è necessario attivare alcun sistema di riscaldamento o raffrescamento per avere una condizione di benessere. La *temperatura base*, pertanto, rappresenta le condizioni di minimo consumo energetico (Figura 3). La relazione tra il picco di carico e il picco di temperatura è piuttosto complessa, in quanto la relazione tra richiesta energetica e temperatura è non lineare.

I metodi più semplici e più utilizzati per stimare il fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento degli edifici sono quelli che ricorrono all'uso dei gradi-giorno (DD), indici che misurano quanto la temperatura media giornaliera si differenzia dalla *temperatura base*.

Con riferimento ancora all'articolo di Scapin et al., (2016), si osserva che c'è un significativo trend in crescita dei gradi-giorno per raffrescamento, legato ad un innalzamento termico osservato in questi ultimi anni. Poiché è atteso un significativo aumento della temperatura per l'Italia nei prossimi decenni (le proiezioni sull'Italia indicano che per il 2050 è atteso un generale aumento di 1-1,5°C, addirittura di 2-2,5°C per i mesi estivi; Faggian 2015), la variabilità climatica e le variazioni climatiche possono avere forti impatti sul fabbisogno energetico nazionale.

Per una corretta modellazione del fabbisogno energetico nazionale è necessario aver a disposizione dati di consumo energetico a scala giornaliera relativi alla climatizzazione degli edifici con un det-

taglio spaziale sufficientemente spinto (a scala comunale) per almeno qualche anno (almeno uno). Non avendo a disposizione dati di questo tipo, il presente studio analizza alcune metodologie per la stima dei gradi-giorno nelle condizioni climatiche attuali e in scenari futuri, come un lavoro preliminare ad una effettiva valutazione del fabbisogno energetico nazionale atteso nei prossimi decenni. Esso è articolato come segue: nella Sezione 2 viene data la definizione di gradi-giorno nella loro accezione più generale e si riportano alcune metodologie per la loro stima. Quindi, si descrivono i data sets utilizzati per valutare i gradi-giorno per l'Italia a scala annuale (Sezione 3). Nella Sezione 4 si discutono i risultati ottenuti, facendo un confronto tra i metodi utilizzati. Infine, si riportano alcune conclusioni (Sezione 5).

2. GRADI-GIORNO: DEFINIZIONE E METODOLOGIA DI CALCOLO

Come già detto sopra, gli indici gradi-giorno (o *degree-days*) sono definiti a partire dalla differenza tra la temperatura esterna media giornaliera (T_m) e la *temperatura base* (T^*).

Per un fissato valore della *temperatura base*, le differenze saranno tipicamente positive in estate e negative in inverno. Per non trattare contemporaneamente valori positivi e negativi, si considerano separatamente le due richieste energetiche di riscaldamento e di refrigerazione, usando due indici distinti, ovvero:

$$\text{heating degree-days: } hdd = \max(T^* - T_m, 0.)$$

$$\text{cooling degree days: } cdd = \max(T_m - T^{**}, 0.)$$

ove:

- T_m è la temperatura media giornaliera di un certo giorno, calcolata dalla media dei 24 valori orari delle temperature, oppure dal valore medio tra la temperatura massima T_{max} e minima T_{min} del giorno considerato $T_m = (T_{min} + T_{max})/2$;
- T^* e T^{**} sono le *temperature base*, rispettivamente per hdd e cdd , esse possono assumere lo stesso valore o essere differenti.

I valori attribuiti alla *temperatura base* sono arbitrari. Essi possono variare significativamente a seconda della regione e della stagione e dipendono anche da come la popolazione si adatta alle condizioni ambientali in cui vive. Ogni stato assume un valore specifico di temperatura base, che può cambiare significativamente da un paese all'altro: in genere è maggiore/inferiore nei paesi con climi più caldi/freddi. Per esempio, è generalmente pa-

ri a 18°C negli Stati Uniti (Amato et al., 2005), ma assume il valore di 11°C a Washington (Huang e Gurney, 2016), 21°C in Florida. Vale 24°C in Thailandia (Parkpoom e Harrison, 2007). Nella maggioranza dei casi i valori di T^* variano tra 12°C e i 22°C (Ranson et al., 2014). Per l'Italia, Scapin et al. (2016) hanno individuato i valori $T^*=15^\circ\text{C}$ e $T^{**}=20^\circ\text{C}$ come i più adeguati per minimizzare gli errori del loro modello di fabbisogno elettrico nazionale applicato sul periodo 1990-2013.

Relativamente agli *hdd*, la temperatura base è in genere più bassa di quella che si vuole ottenere negli ambienti riscaldati (tipicamente 20-22°C). La riduzione è tanto maggiore quanto maggiore è il grado di isolamento dell'edificio e l'entità degli apporti solari e interni. In Italia il DPR 412/93 convenzionalmente pone la temperatura base a 20°C. Inoltre, il successivo DPR 74/2013 impone che "Durante il funzionamento dell'impianto di climatizzazione invernale, la media ponderata delle temperature dell'aria, misurate nei singoli ambienti riscaldati di ciascuna unità immobiliare, non deve superare: a) 18°C + 2°C di tolleranza per gli edifici adibiti ad attività industriali, artigianali e assimilabili; b) 20°C + 2°C di tolleranza per tutti gli altri edifici".

Relativamente ai gradi-giorno per il condizionamento estivo, non sono disponibili riferimenti alla normativa italiana ad eccezione del DPR 74/2013, secondo il quale "Durante il funzionamento dell'impianto di climatizzazione estiva, la media ponderata delle temperature dell'aria, misurate nei singoli ambienti raffrescati di ciascuna unità immobiliare, non deve essere minore di 26°C - 2°C di tolleranza per tutti gli edifici".

Stante una certa indeterminazione del metodo di calcolo di *hdd* e *cdd*, nel presente lavoro si è fatto riferimento al metodo adottato da EUROSTAT-JRS/MARS per tutta Europa e, per confronto, al metodo proposto da Giannakopoulos considerato nell'ambito del progetto europeo ENSEMBLES (Van Der Linden et al., 2009), ovvero:

JRC/MARS-EUROSTAT (J)

$$\begin{aligned} hdd &= \max(T^* - T_m, 0) & T^* &= 18^\circ\text{C se } T_m < 15^\circ\text{C} \\ cdd &= \max(T_m - T^{**}, 0) & T^{**} &= 21^\circ\text{C se } T_m > 24^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Giannakopoulos (G)

$$\begin{aligned} hdd &= \max(T^* - T_m, 0) & T^* &= 15^\circ\text{C} \\ cdd &= \max(T_m - T^{**}, 0) & T^{**} &= 25^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Come si può dedurre dalla loro definizione, le due formulazioni *J* e *G* si differenziano fondamental-

mente per diverse assunzione di *temperature base*: per stimare *hdd*, secondo il criterio *J* si utilizzano valori soglia maggiori rispetto ai corrispondenti *G* (rispettivamente, $T^*=18^\circ\text{C}$ e $T^*=15^\circ\text{C}$); al contrario i valori soglia assunti da *J* per il calcolo dei *cdd* sono inferiori a quelli di *G* (rispettivamente, $T^{**}=21^\circ\text{C}$ e $T^{**}=25^\circ\text{C}$). Quindi i gradi-giorno ottenuti da *J* saranno maggiori dei corrispondenti *G* sia per HDD che per CDD.

Un aspetto fondamentale nel valutare i DD riguarda l'accuratezza con cui si calcolano le medie spaziali. In generale, i DD sono valutati a partire dai valori misurati in una postazione o sui singoli punti griglia derivanti da data-set osservativi o da modelli come nel nostro caso (Sezione 3). Da questi singoli valori puntuali si ricavano poi valori mediati a scala provinciale, regionale e nazionale.

Come verifica preliminare, è stato dapprima applicato il criterio *J*, utilizzando i dati di temperatura di E-OBS, trattando in modo uniforme tutti i punti griglia $k(i,j)$ relativi al territorio italiano, in modo del tutto analogo con quanto fatto da JRC/MARS.

Nel calcolo di valori medi nazionali, se trattare tutti i punti del territorio italiano con uno stesso peso può essere ragionevole per alcune variabili, risulta non idoneo nel calcolo dei gradi-giorno. Poiché il fabbisogno energetico è correlato alle volumetrie di edificato che devono essere termoregolate, si è ritenuto opportuno affinare la stima degli indici tenendo conto della distribuzione della popolazione sul territorio nazionale.

Pertanto, è stata effettuata una nuova valutazione dei valori medi nazionali considerando la distribuzione spaziale della popolazione quale variabile proxy della distribuzione spaziale dei consumi energetici. In questo caso, il computo dei gradi-giorno nazionali, è stato fatto associando a ciascun punto griglia $k(i,j)$ il peso:

$$weight_k = inhabit_k / tot$$

ove:

- $inhabit_k$ è la popolazione relativa alla cella centrata sul punto $k(i,j)$;
- tot è la popolazione totale italiana.

È stato così attribuito ai punti del territorio in zone alpine, scarsamente abitate, un peso inferiore rispetto ad aree urbanizzate e densamente abitate, come rappresentato in Figura 4.

Dopo aver calcolato, per ogni punto griglia del territorio nazionale, i valori giornalieri $hdd_k(ig)$ e $cdd_k(ig)$ per ciascun giorno ig di ogni anno iy del periodo considerato (1961-2050), sono stati stima-

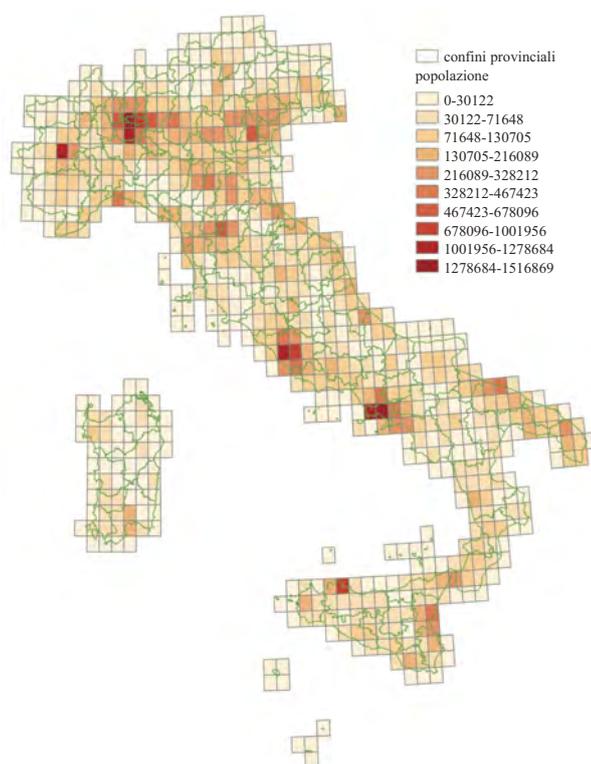


Figura 4 – Distribuzione della popolazione italiana sul suolo nazionale

ti i valori nazionali $HDD(iy)$ e i $CDD(iy)$, facendo le cumulate annuali:

$$HDD(iy) = \sum_{ig=1}^{ngy} \sum_{k=1}^N weight_k hdd_k(ig)$$

$$CDD(iy) = \sum_{ig=1}^{ngy} \sum_{k=1}^N weight_k cdd_k(ig)$$

ove:

- $ngy = 365$ (o 366 nel caso di anno bisestile);
- N è il numero di punti griglia che cadono all'interno del territorio nazionale.

3. DATA-SETS

Nel seguito si descrivono brevemente i data-sets utilizzati nello studio (EUROSTAT, JRC/MARS, E-OBS, MESAN, ENSEMBLES), rinviando ai corrispondenti link per informazioni più dettagliate. Dai primi due sono stati dedotti direttamente i gradi-giorno per l'Italia (come riferimento per le elaborazioni eseguite), dagli altri tre archivi sono stati scaricati i valori di temperatura media giornaliera utilizzati per il calcolo dei gradi-giorno.

EUROSTAT (<http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>) pubblica i dati calcolati da

JRC/MARS (<http://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/DataPortal/Index.aspx>) per il periodo dal 1974 al 2015 a livello nazionale e regionale. I dati dei gradi-giorno sono ottenuti a partire dai valori di temperatura delle stazioni meteorologiche disponibili, interpolati da JRC/MARS su una griglia regolare con una risoluzione di 25 km su tutta Europa. I valori medi regionali e nazionali sono calcolati considerando i punti griglia che ricadono all'interno del rispettivo territorio amministrativo (EC, 2016b).

Poiché i data-set EUROSTAT e JRC/MARS sono identici, in quanto entrambi derivano dalle valutazioni condotte da JRC/MARS, nel seguito si farà riferimento al solo data-set JRC/MARS.

L'archivio *E-OBS* (<http://eca.knmi.nl/dailydata>) è considerato dalla comunità scientifica internazionale come data-set di riferimento per la stima di variabili climatologiche e per le validazioni modellistiche, in quanto mette a disposizione su una griglia regolare alla risoluzione $0,25 \times 0,25$ gradi i dati giornalieri di precipitazione, temperatura minima, media e massima, ottenuti da osservazioni puntuali, attraverso processi di interpolazione (Haylock et al., 2008).

Le stime dei gradi-giorno sono state effettuate utilizzando i dati di temperatura media della Versione 17.0, per il periodo dal 01/01/1961 al 31/12/2017.

MESAN (*MESocale ANalysis system*, <https://ecds.se/dataset>) è un data-set di rianalisi meteorologica ad alta risoluzione ($0,05^\circ$, circa 5 km) di campi superficiali di temperatura, intensità del vento a 10 m e precipitazione, a scala giornaliera, sviluppato all'interno del progetto "FP7/EURO4M" ed ha un'estensione temporale che copre il periodo 1979-2013. Tali dati meteorologici si basano sulle uscite di un modello numerico di previsione ad alta risoluzione *HIRLAM* (*HI-Resolution Limited-Area Model*) inizializzato con un sistema di rianalisi globale ERA-Interim sviluppato dallo *European Center for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF).

Nell'ambito del Progetto Europeo *ENSEMBLES* (<http://ensembles-eu.metoffice.com/data.htm>), sono state realizzate numerose simulazioni modellistiche con diversi modelli regionali (RCMs, *Regional Circulation Models*), innestati in diversi modelli globali (GCMs, *Global Circulation Models*). Tra tutte le simulazioni presenti in archivio sono stati estratti 10 *runs* (Tabella 1) con le seguenti caratteristiche:

- risoluzione spaziale di 25 km;
- risoluzione temporale giornaliera;
- configurazione con scenario emissivo SRES A1B (Nakićenović et al., 2000).

Tabella 1 – Lista delle simulazioni ENSEMBLES considerati nello studio. Per ciascuna di esse, oltre al nome (che contiene l'acronimo dell'istituto di ricerca che l'ha realizzata), è indicato anche il modello di circolazione globale (GCM) rispetto al quale è stato innestato il modello climatico regionale (RCM) e l'acronimo identificativo la simulazione stessa

GCM	RCM	Simulazione	Acronimo
ARPEGE_RM5.1	Aladin	CNRM-RM5.1_ARPEGE	C&A
ARPEGE	HIRHAM5	DMI-HIRHAM5_ARPEGE	D&A
BCM	HIRHAM5	DMI-HIRHAM5_BCM	D&B
HadCM3Q0	CLM	ETHZ-CLM_HadCM3Q0	E&H
ECHAM5-r3	ICTP-REGCM3	ICTP-REGCM3_ECHAM5	I&E
ECHAM5-r3	RACMO	KNMI-RACMO2_ECHAM5	K&E
HadCM3Q0	HadRM3Q0	METO-HC_HadCM3Q0	M&H
HadCM3Q0	RCA	SMHIRCA_HadCM3Q3	S&H
ECHAM5-r3	RCA	SMHIRCA_ECHAM5	S&E
BCM	RCA	SMHIRCA_BCM	S&B

Anche se attualmente sono disponibili per l'Europa risultati di simulazioni climatiche regionali più aggiornate e più risolte (il Progetto CORDEX fornisce i risultati di modelli alla risoluzione 0,11°, circa 12 km, www.cordex.org/domains/cordex-region-euro-cordex/), in questo studio sono stati considerati i dati di temperatura forniti dai modelli ENSEMBLES per avere un riferimento diretto coi risultati della pubblicazione "Climate change and impacts" (Van Der Linden and Mitchell, 2009) che esprime il potenziale di fabbisogno energetico per riscaldamento e raffreddamento sul Mediterraneo in termini di gradi-giorno calcolati utilizzando il data-set ENSEMBLES. Si rinvia ad un prossimo studio la stima dei gradi-giorno utilizzando dati di simulazioni modellistiche più recenti.

4. ANALISI DEI RISULTATI

A partire, dunque, dai data-sets sopra ricordati (alcuni relativi alle stime DD, altri riguardanti i valori di temperatura media giornaliera), sono state fatte alcune analisi relativamente ai valori HDD e CDD, caratterizzando dapprima la situazione attuale e, in seguito, il trend per i prossimi decenni. In via preliminare, è stato applicato il metodo *J* per la stima degli indici HDD e CDD a scala nazionale, utilizzando i dati di temperatura di E-OBS e trattando in modo uniforme i punti griglia di calcolo (in analogia a quanto fatto da JRC/MARS). La caratterizzazione dei pattern spaziali nelle condizioni climatiche attuali è riportata nel paragrafo (§) 4.1.

Allo scopo di utilizzare i risultati delle simulazioni ENSEMBLES per il computo dei DD fino al

2050, sono state dapprima analizzate le serie di temperatura fornite dai modelli (§ 4.2), poiché la stima dei gradi-giorno dipende essenzialmente dai valori della temperatura (una volta fissato T^*) secondo i metodi di calcolo adottati.

Quindi, utilizzando entrambi i criteri *J* e *G*, sono state analizzate le variazioni attese degli indici HDD e CDD tra lo scenario futuro 2021-2050 e quello di riferimento 1961-1990, quali indicatori delle variazioni del fabbisogno energetico (§ 4.3).

Successivamente, sono state indagate le differenze tra le stime di DD ottenute utilizzando distintamente le temperature di E-OBS, MESAN ed ENSEMBLES in riferimento ai dati pubblicati da JRC/MARS (*JM*). Con i dati di ENSEMBLES sono stati quindi caratterizzati i trend annuali a scala nazionale fino al 2050, utilizzando entrambi i criteri *J* e *G* ma focalizzando l'attenzione soprattutto sui risultati ottenuti dalla metodologia *J* (§ 4.4).

4.1. Analisi pattern spaziali di HDD e CDD

È stata condotta un'analisi dei pattern spaziali dei DD nel passato, considerando i valori medi nella prima e nella seconda metà del periodo storico, visto che anche in Italia si è osservato un aumento della temperatura, come descritto anche nel seguito (Figura 9).

I due grafici in Figura 5 mostrano i valori HDD mediati su due periodi di 25 anni ciascuno, caratterizzanti la prima e la seconda parte del periodo storico, (ovvero i periodi 1961-1985 e 1993-2017), ottenuti applicando il metodo JRC/MARS.

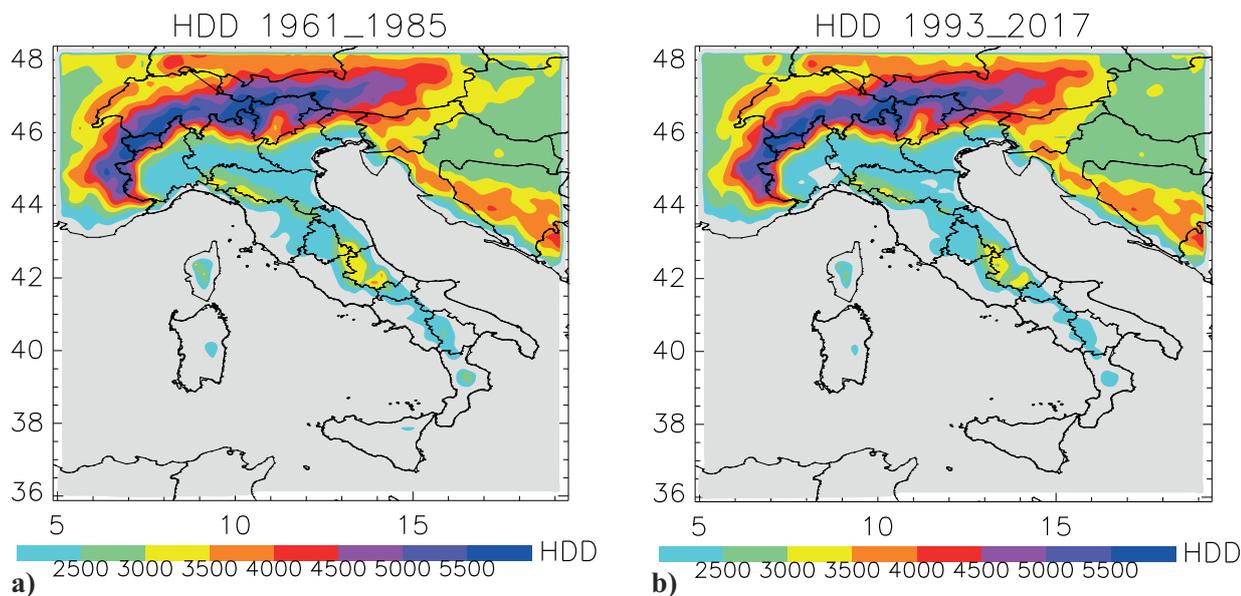


Figura 5 – Distribuzione spaziale dei valori HDD, calcolati secondo la metodologia JRC/MARS, mediati sui periodi 1961-1985 (a) e 1993-2017 (b) sulla base delle temperature E-OBS

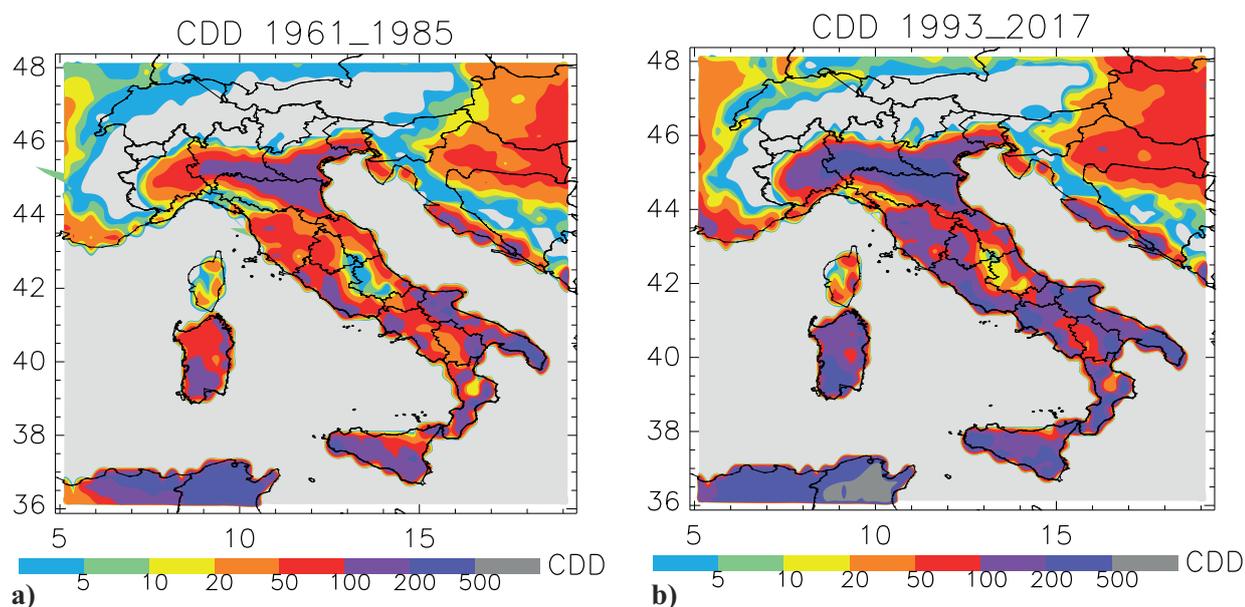


Figura 6 – Come Figura 5 ma riferita ai patterns spaziali di CDD

Entrambe le mappe mostrano chiaramente come i punti a quote elevate, caratterizzati dalle temperature più basse, diano i contributi maggiori alla stima di HDD. Per il periodo più recente (Figura 5b) si ottiene una mappa simile a quella del 1961-1985 (Figura 5a) ma con valori ridotti, per effetto dell'aumento termico degli ultimi anni.

In modo analogo, la Figura 6 presenta le mappe dei CDD per gli stessi due periodi.

In entrambi i casi, i punti di griglia con i CDD maggiori sono quelli relativi alle zone pianeggianti, notoriamente caratterizzate da temperature elevate. Come per gli HDD, è interessante osservare

come variano i valori dei CDD nei due periodi: l'aumento della temperatura registrato negli ultimi decenni determina un aumento dei valori CDD (Figura 6b), mentre i patterns spaziali rimangono sostanzialmente invariati rispetto a quelli degli anni precedenti (Figura 6a).

4.2. Analisi delle temperature annuali sull'Italia

Prima di utilizzare i dati ENSEMBLES per la stima dei gradi-giorno medi nazionali, sono state effettuate alcune analisi per valutare le performance modellistiche nella ricostruzione delle temperatu-

re, facendo riferimento ai dati E-OBS. Come periodo di verifica sono stati considerati gli anni 1991-2015, ovvero 15 anni del periodo più recente perché di maggior interesse.

Come metrica dell'errore, sono stati utilizzati gli indici *BIAS* e *MAE* (*Mean Absolute Error*).

Per ciascuno dei 10 modelli ENSEMBLES (Tabella 1), tali indici sono stati calcolati come matrici a scala mensile. A questo scopo, è stato considerato per ogni punto griglia $k(i,j)$ del data-set di riferimento le differenze tra v_{k_mod} e v_{k_obs} , rispettivamente il valore medio giornaliero di temperatura del modello (relativo al punto griglia più vicino al punto k considerato) e quello di E-OBS. I due indici sono stati pertanto calcolati secondo le seguenti definizioni:

$$BIAS_k(im) = \frac{1}{ny} \sum_{iy=yyi}^{yyf} \sum_{ig=1}^{ngg(im)} v_{k_mod}(ig,im,iy) - v_{k_obs}(ig,im,iy)$$

$$MAE_k(im) = \frac{1}{ny} \sum_{iy=yyi}^{yyf} \sum_{ig=1}^{ngg(im)} |v_{k_mod}(ig,im,iy) - v_{k_obs}(ig,im,iy)|$$

ove:

- ig, im, iy indicano rispettivamente giorno, mese, anno del periodo considerato a partire dall'anno iniziale $yyi=1991$ fino all'anno finale $yyf=2015$, per un totale di $ny=25$ anni;
- $ngg(im)$ sono i giorni relativi al mese im .

Le performance complessive di ciascun modello sono state stimate calcolando i valori medi $\langle BIAS \rangle$ e $\langle MAE \rangle$, ottenuti mediando gli indici su tutti i punti griglia del suolo nazionale e su tutti i mesi:

$$\langle BIAS \rangle = \sum_{im=1}^{12} \sum_{k=1}^N BIAS_k(im)$$

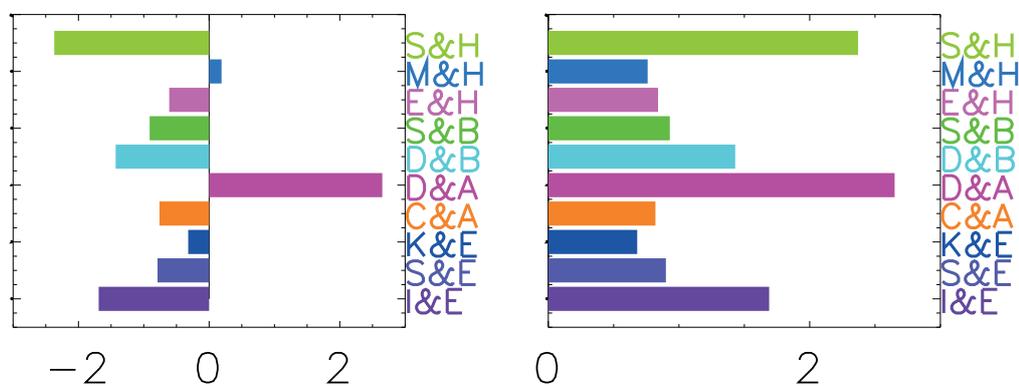


Figura 7 – Indici di errore *BIAS* (diagramma a barre a sinistra) e *MAE* (a destra) relativamente alle temperature medie nazionali annuali stimate dai modelli ENSEMBLES (ciascuno identificato da un colore diverso secondo l'acronimo riportato sull'asse delle ordinate a destra) rispetto ai valori annuali di temperature per l'Italia forniti da E-OBS

$$\langle MAE \rangle = \sum_{im=1}^{12} \sum_{k=1}^N MAE_k(im)$$

ove N è il numero di punti griglia che identificano il territorio nazionale.

La Figura 7 riporta i valori di $\langle BIAS \rangle$ (a sinistra) e $\langle MAE \rangle$ (a destra) distinti per ciascun modello. Come già emerso in precedenti lavori (Faggian, 2015) i due indici sono risultati concordi nell'identificare i modelli più performanti.

Per esemplificare l'effetto della correzione operata sui dati, si riportano in Figura 8 tre mappe della temperatura media dell'anno 2010. Esse descrivono, nell'ordine da sinistra a destra, campo termico descritto da E-OBS, dalla media ottenuta utilizzando i valori grezzi dei 10 modelli e, infine, il campo termico calcolato considerando i valori modellistici ottenuti rimuovendo il bias (detti nel seguito "bias-corretti").

Dalle mappe si evince come attraverso la semplice correzione operata su ogni punto griglia, mediante $BIAS_k(im)$, si ottiene un campo modellistico più aderente a quello di riferimento. In particolare, si osservi come i valori termici della regione alpina, originariamente inferiori a quelli di E-OBS anche di 2-4°C, risultano ora più vicini al valore di riferimento.

La ricostruzione modellistica a scala nazionale delle temperature dei 10 modelli è illustrata nella Figura 9 che visualizza le stime medie annuali ottenute dai dati grezzi delle simulazioni (ENS10) e dai dati modellistici bias-corretti (ENS10_C), a confronto con i valori medi annuali dedotti da E-OBS.

Dalla Figura 9 si osserva che la serie modellistica ENS10_C ha valori di temperatura di circa 1°C

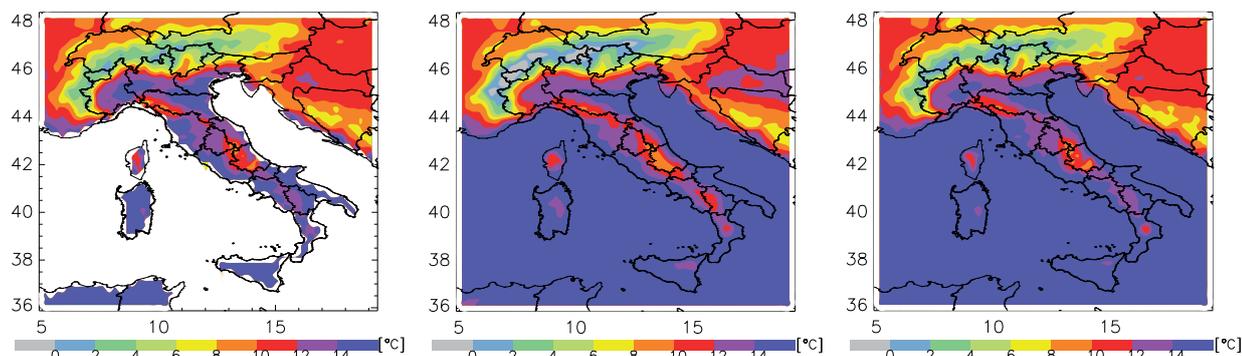


Figura 8 – Temperatura media dell'anno 2010 descritta nell'ordine da: E-OBS (sinistra), dalla media dei valori grezzi dei 10 modelli ENSEMBLES (centro), dalla media dei valori bias-corretti degli stessi 10 modelli (destra)

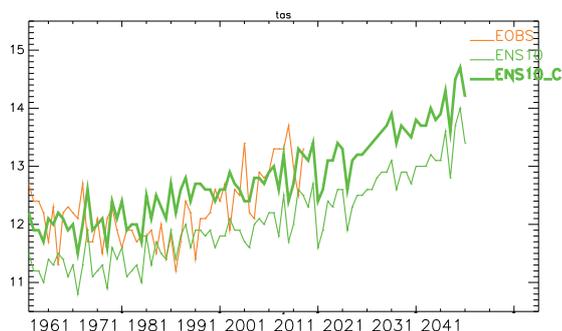


Figura 9 – Temperature medie annuali per l'Italia dedotte da E-OBS (line arancione), dalla media dei valori grezzi dei 10 modelli (ENS10, linea verde sottile) e dai valori bias-corretti (ENS10_C linea verde spessa)

superiori a quelli dedotti dai dati grezzi ENS10 e riproduce abbastanza bene i dati di riferimento E-OBS, soprattutto per il periodo rispetto al quale è stato calcolato lo scarto, con differenze che, per la maggior parte dei casi, sono di pochi decimi di grado.

Si ricordi che i modelli climatici sono costruiti per modellare il sistema climatico su lunghi periodi e perciò, pur mantenendo alla base le leggi fondamentali della fisica quali la conservazione della massa, dell'energia e del momento, sono semplificazioni dei modelli meteorologici, capaci tuttavia di simulare gli aspetti essenziali della variabilità climatica, secondo quanto descritto dalle osservazioni, su diverse scale temporali. Pertanto, una volta verificate le loro performance nel descrivere in termini statistici e non deterministici la realtà, risultano uno strumento fondamentale per poter descrivere il clima attuale ed elaborare degli scenari sulle possibili evoluzioni del sistema climatico. Non sono invece finalizzati a descrivere le condizioni meteorologiche del singolo anno, per

il quale possono mostrare particolari limiti nella sua ricostruzione quanto più l'anno in esame presenta caratteristiche *anomale* rispetto alle condizioni climatiche tipiche.

4.3. Analisi delle variazioni spazio-temporali dei gradi-giorno nei prossimi decenni

Considerato che già i dati osservati testimoniano un aumento delle temperature negli ultimi decenni e vari studi indicano che il territorio nazionale sarà ulteriormente interessato da un aumento non uniforme delle temperature (Faggian, 2015), risulta interessante esplorare quali siano gli scenari futuri per i DD secondo le due metodologie considerate.

Le Figure 10 e 11 mostrano rispettivamente i pattern spaziali delle variazioni dei DD, calcolate per lo scenario 2021-2050 rispetto ai valori del periodo di riferimento 1961-1990 secondo *J* e *G*.

Coerentemente col riscaldamento previsto, si trova una diminuzione degli HDD. I due metodi caratterizzano tali variazioni con pattern spaziali analoghi, correlati all'orografia, con valori più elevati secondo il criterio *J* rispetto a *G* (Figura 10a, Figura 11a): le diminuzioni attese sono maggiori sui rilievi, in particolare sulle aree alpine ove gli HDD si riducono di circa un fattore 3 rispetto a quanto atteso per le aree di pianura. In termini percentuali, si trova però una variazione uniforme sul territorio (del 15% secondo *J*, del 15-20% con *G*; per brevità non sono state riportate le mappe).

Come atteso, i CDD sono previsti in aumento, con variazioni dipendenti dalla quota orografica. In questo caso sono maggiori nelle zone di pianura, essendo circa il doppio rispetto all'incremento caratterizzante i CDD sui rilievi appenninici. In va-

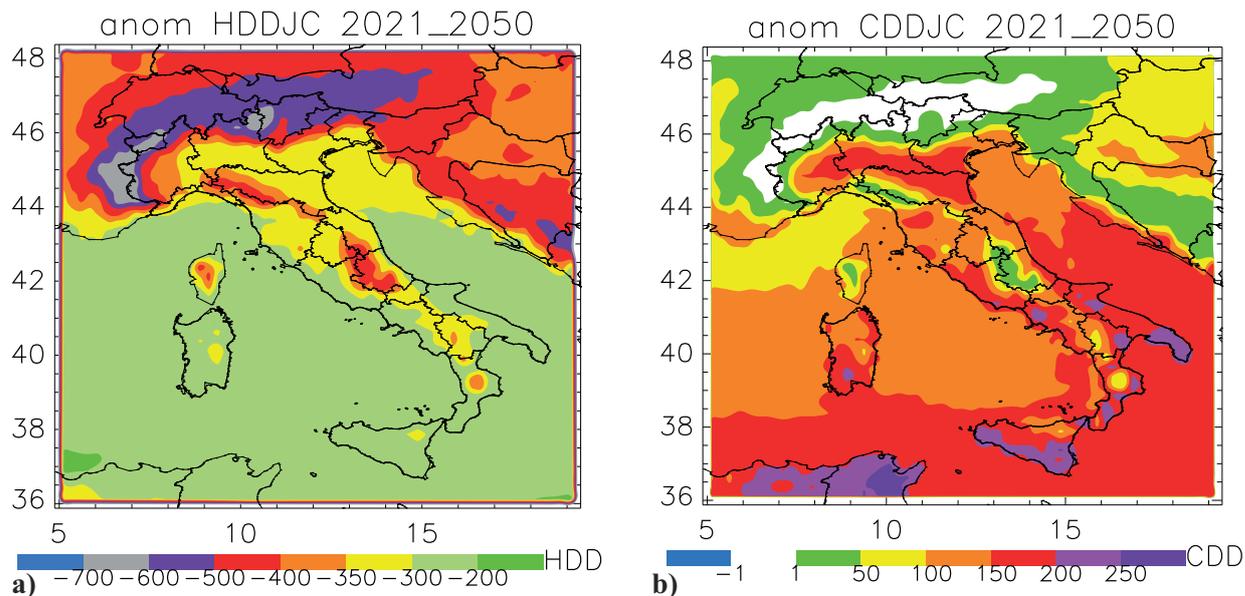


Figura 10 – Variazione degli HDD (sinistra) e CDD (destra) nello scenario futuro 2021-2050 rispetto allo scenario di riferimento 1961-1990 ottenute applicando il metodo JRC ai dati ENS10 bias-corretti

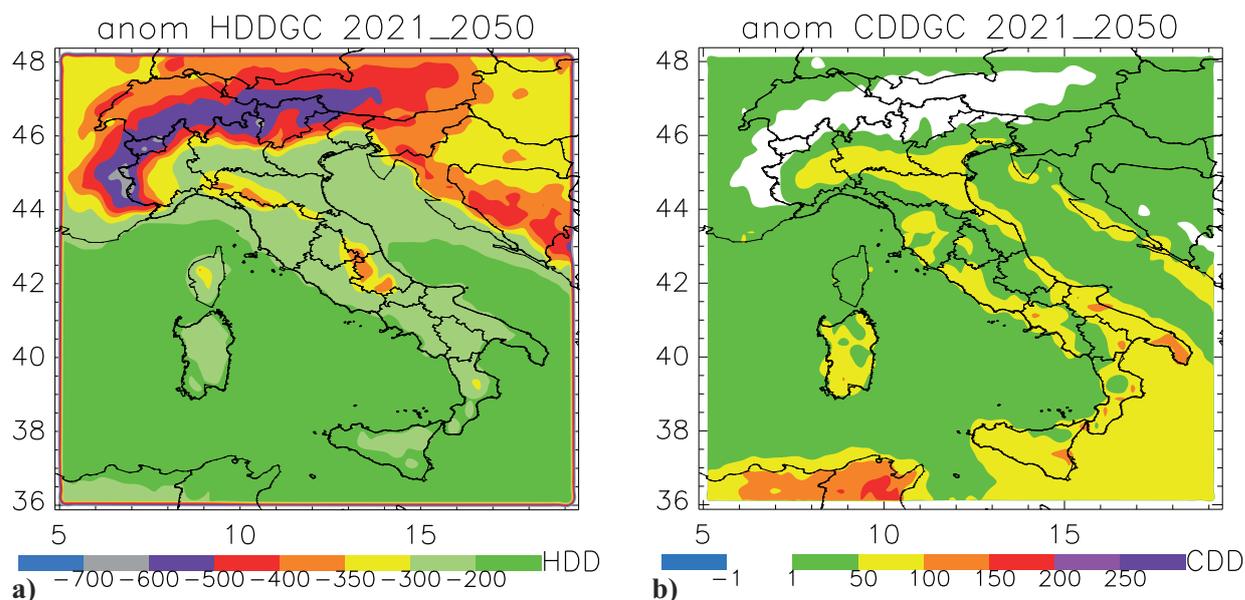


Figura 11 – Come Figura 10 ma applicando il metodo Giannakopoulos ai dati ENS10 bias-corretti

lore assoluto l'aumento descritto utilizzando J è maggiore rispetto a quello descritto da G (Figura 10b, Figura 11b), ma in termini percentuali i risultati cambiano (non sono state riportate le mappe): l'aumento percentuale interessa maggiormente i rilievi rispetto alle regioni a bassa quota ed è maggiore se si applica G : circa 100-150% sui rilievi e di 50-100% in pianura secondo J (Figura 10b), rispettivamente $\sim 200\%$ e 150% secondo G .

Pertanto, le due metodologie danno trend diversi, soprattutto per quanto riguarda i CDD.

4.4. Analisi delle serie dei gradi-giorno medi nazionali per l'Italia

Le serie storiche dei gradi giorni per il passato sono state analizzate confrontando i gradi-giorno ottenuti utilizzando distintamente i dati di temperatura degli archivi E-OBS, MESAN ed ENSEMBLES con quelli pubblicati da JRC/ MARS (JM). Mentre, le proiezioni future sono state dedotte necessariamente dai soli dati modellistici.

Rispetto alle stime JM dei gradi-giorno, si discutono dapprima i risultati ottenuti mediante il meto-

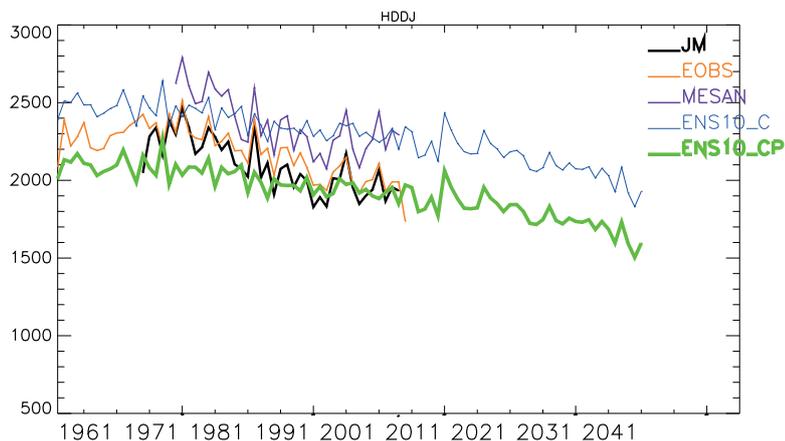


Figura 12 – Valori annuali di HDD pubblicati da JRC/MARS (linea nera) e calcolati secondo il criterio JRC/MARS utilizzando i valori giornalieri di temperatura di EOBS (linea arancio) e MESAN (viola). I valori calcolati da ENS10 bias-corretti e pesati con la popolazione (ENS10_CP) sono rappresentati dalla linea verde

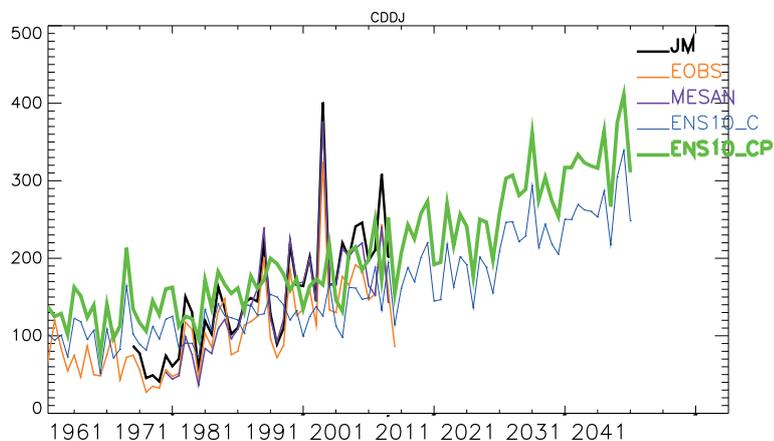


Figura 13 – Come Figura 12 ma per i valori annuali di CDD

do J , poi si analizzano brevemente le stime dedotte applicando il criterio G .

Per le simulazioni ENSEMBLES, si riportano i soli risultati ottenuti con la serie ENS10_CP, ovvero i valori ottenuti dalle *ensemble* dei 10 modelli con temperature bias-corrette e pesati con la distribuzione della popolazione, considerando che, per le ragioni dette sopra (Sezione 2), si ritengono meglio correlati al fabbisogno energetico associato alla climatizzazione domestica rispetto alle stime ENS10_C ottenute utilizzando le temperature bias-corrette e trattando i punti griglia in modo uniforme.

Dalla Figura 12 si evince che le stime HDD dedotte da E-OBS come media di tutti i punti del territorio nazionale (linea arancio) si allineano bene ai valori pubblicati da JM che, calcolati nello stesso modo, sono evidentemente ottenuti a partire da un data-set di temperature locali molto si-

mile, ma non coincidente, a quello di E-OBS (prevalentemente dati SYNOP). I valori calcolati utilizzando le temperature di MESAN sono invece più elevati, come è ragionevole aspettarsi dal momento che questo data-set, di risoluzione più spinta rispetto a E-OBS, descrive più accuratamente il campo termico, in particolare le zone fredde a quote elevate andando così a incrementare significativamente il computo degli HDD. I valori HDD forniti da ENS10_CP risultano sensibilmente inferiori (del 20% circa) rispetto ai valori ottenuti da ENS10_C (questi non sono stati visualizzati), in quanto i contributi maggiori nel calcolo sono dati dai punti griglia con elevata densità abitativa, tipicamente a quote medio-basse, più calde delle zone montane.

Anche nel caso dei CDD, le stime dedotte applicando J ai dati di temperatura di E-OBS e MESAN riproducono bene i valori JM (Figura 13).

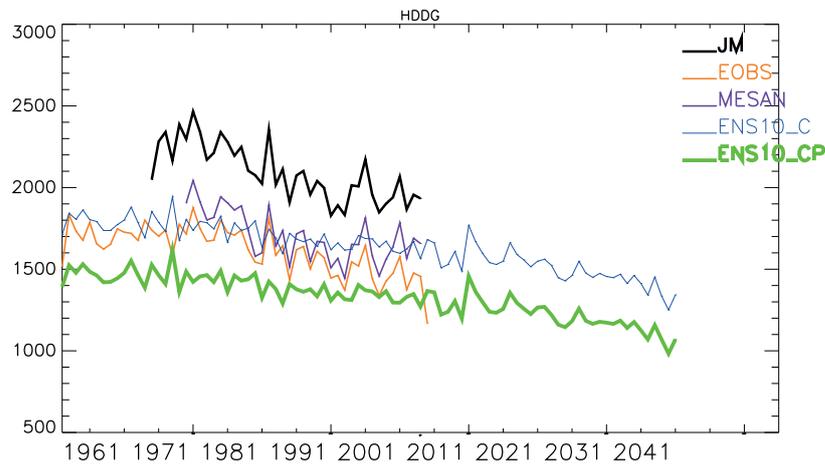


Figura 14 – Come Figura 12 ma per valori HDD calcolati secondo il criterio Giannakopoulos

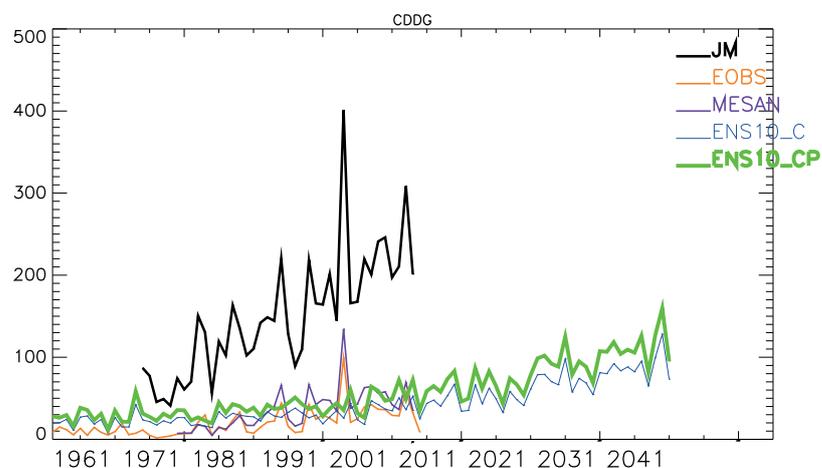


Figura 15 – Come Figura 13 ma per valori CDD calcolati secondo il criterio Giannakopoulos

I valori CDD stimati utilizzando i pesi sono leggermente superiori o, comunque, molto simili a quelli ottenute trattando in modo uniforme i punti di griglia. In effetti, la popolazione risiede prevalentemente in pianura, quindi, in corrispondenza agli stessi punti griglia che, caratterizzati dalle temperature più alte, pesano di più nel calcolo dei CDD.

Si noti come il picco relativo all'anno 2003 non sia riprodotto dai modelli che, come si diceva sopra (§ 4.2), non sono finalizzati a descrivere le condizioni meteorologiche del singolo anno.

Dall'analisi dei valori annuali di HDD e CDD della serie ENS10_CP, i trend dedotti indicano che, rispetto alle attuali condizioni, si attende in Italia una significativa diminuzione degli HDD (~20% a fine 2050, Figura 12) e un aumento importante dei CDD (~75% a metà secolo, Figura 13) a causa del riscaldamento previsto.

Se risulta soddisfacente l'accordo tra i gradi-giorno *JM*, pubblicati da JRC/MARS, e i valori de-

dotti da E-OBS e MESAN usando la metodologia JRC/MARS, come previsto emergono significative differenze tra i gradi-giorno *JM* e quelli calcolati applicando il criterio *G*, che utilizza temperature base differenti rispetto a quelle fissate in JRC/MARS (Figure 14 e 15).

Dall'analisi delle serie ENS10_CP, si deduce che i trend attesi per l'Italia sono simili ai precedenti nel caso degli HDD (~30% a fine 2050, Figura 14) mentre l'aumento percentuale dei CDD atteso al 2050 è superiore al precedente (~140%, Figura 15).

5. CONCLUSIONI

Per la climatizzazione delle abitazioni vengono impiegate considerevoli quantità di combustibile fossile, con conseguenti emissioni di gas-serra. In una strategia di decarbonizzazione, diventa dunque fondamentale stimare adeguatamente il fabbisogno energetico nazionale. A questo scopo i modelli

energetici impiegati per elaborare gli scenari di medio-lungo termine richiedono in input anche informazioni relative al fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento, i cui valori di picco sono fortemente correlati ai valori estremi di temperatura massima e minima.

Per descrivere la relazione *non* lineare tra domanda energetica e temperatura, si utilizzano gli indici “gradi-giorno” (DD).

Il lavoro svolto ha avuto come obiettivo quello di stimare i gradi-giorno medi annuali per riscaldamento (HDD) e raffrescamento (CDD) relativi all’Italia nelle condizioni attuali e per le prossime decadi. A tale scopo sono state impiegate due metodologie: la prima JRC/MARS (*J*) perché di riferimento per l’Europa; la seconda, proposta da Giannakopoulos (*G*) e adottata nel Progetto Europeo ENSEMBLES, è stata considerata come confronto. Esse differiscono sostanzialmente nell’uso di diversi valori di temperature-base, rispetto ai quali si calcolano i gradi-giorno, a partire dalle temperature medie giornaliere.

Le due metodologie *J* e *G* sono state applicate usando i dati di temperatura media giornaliera, su griglie regolari relative al suolo nazionale, dedotti da 3 data-base: E-OBS e MESAN (di riferimento, in quanto entrambi forniscono campi termici a partire da dati osservati), ed ENSEMBLES (risultati di simulazioni modellistiche dal 1961 al 2050, fornite da dieci modelli climatici regionali).

Seguendo la metodologia indicata da JRC/MARS, la stima dei valori medi nazionali è stata ottenuta inizialmente trattando in modo equivalente ogni punto griglia del suolo nazionale: il confronto tra i gradi-giorno pubblicati da JRC/MARS ed i valori dedotti dai due data-set di riferimento è risultato soddisfacente (soprattutto E-OBS), così come è risultato soddisfacente il confronto tra i dati JRC/MARS e le stime ottenute utilizzando i dati di temperatura di ENSEMBLES, una volta corretti rispetto ai valori di riferimento E-OBS. Invece, sono risultate sensibilmente inferiori, rispetto ai gradi-giorno JRC/MARS, i risultati dedotti applicando il criterio Giannakopoulos per l’effetto dei diversi valori di temperature base utilizzati.

Successivamente, per ottenere stime di DD più rappresentative delle diverse esigenze di climatizzazione degli edifici sul territorio nazionale, si è considerata anche la distribuzione spaziale della popolazione come variabile proxy del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento. Associando ad ogni punto griglia un peso dato dalla densità abitativa, i nuovi valori HDD sono risulta-

ti sensibilmente inferiori (del 20% circa) rispetto a quelli calcolati pesando in modo uniforme tutti i punti di griglia, essendo la popolazione prevalentemente ubicata a quote medio-basse (caratterizzate da temperature più alte rispetto a quelle dei rilievi), mentre i nuovi CDD sono risultati leggermente superiori o, comunque, molto simili a quelli ottenuti precedentemente.

Le proiezioni fatte sui valori attesi per le prossime decadi indicano una sostanziale riduzione degli HDD (~25% a fine 2050) e un significativo aumento dei CDD (a metà secolo ~100% secondo *J*, ~140% secondo *G*).

Va osservato che il calcolo dei DD, dipendenti direttamente dal dato di temperatura, potrebbe essere affinato migliorando la correzione apportata alla temperatura stessa: nel presente lavoro questa variabile meteorologica è stata “corretta” in ogni punto griglia rispetto al valore di BIAS mensile calcolato sul periodo 1991-2015. Si potrebbe ottenere una miglior ricostruzione, applicando tecniche di ricalibrazione delle temperature tipo *quantile mapping* (es. Piani, 2010).

Si noti, inoltre, che per una stima più accurata dei DD, andrebbero considerati anche gli effetti di altre variabili meteorologiche, quali vento ed umidità. In particolare, per una stima più realistica dei CDD non si dovrebbe trascurare l’umidità relativa, da cui dipende fortemente la temperatura percepita e, quindi, la necessità di condizionamento dell’abitazione.

Come già ricordato, i valori presentati riguardano prevalentemente i valori medi annuali sull’Italia. Poiché tali stime sono state ottenute da matrici di dati con risoluzione 25 km, utilizzando maschere di geo-referenziazione per regioni, province e/o comuni, la metodologia proposta consente di scendere al dettaglio voluto (compatibilmente con la risoluzione spaziale utilizzata).

Ci si aspetta, inoltre, che tale metodologia possa dare risultati più soddisfacenti se applicata alle più recenti simulazioni climatiche disponibili grazie al Progetto CORDEX, che hanno una risoluzione spaziale più spinta.

Il presente lavoro ha indagato le potenzialità di due diverse tecniche di calcolo dei gradi-giorno. Si prevede di continuare lo studio confrontando le stime degli indici DD con i dati di fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento (attualmente non disponibili), per verificare le correlazioni tra le stime fatte e l’effettivo impatto sul fabbisogno energetico. In questo processo, oltre ai dati di consumo per la climatizzazione domestica dovranno

essere considerate, se disponibili, anche informazioni relative alle caratteristiche costruttive, il grado di isolamento degli edifici, e dati relativi alla penetrazione degli impianti di condizionamento domestico, che ha avuto un forte incremento soprattutto in questi ultimi anni con l'installazione di sistemi di sempre maggior efficienza energetica.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Amato A.D., Ruth M., Kirshen P., Horwit J. (2005) Regional Energy Demand Responses to Climate Change Methodology and Application to the Commonwealth of Massachusetts. *Climate Change* 71, 175-201.
- Apadula F., Bassini A., Elli A., Scapin S. (2012) Relationships between meteorological variables and monthly electricity demand. *Applied Energy* 98, 346-356.
- European Commission (2016a) An EU Strategy on Heating and Cooling; (SWD(2016) 24 final).
- European Commission (2016b) The methodology applied to produce estimate of HDD and CHH for Italy". Ref Ares (2016) 3922917. Lettera di risposta del JRC alla richiesta di informazioni ISPRA allegata al rapporto "Consumi energetici e heating degree days (HDD) a confronto. Proiezioni al 2050 degli HDD in differenti scenari climatici", Rapporto ISPRA 277/2017.
- Giannakopoulos C., Hadjinicolaou P., Zerefos C., Demosthenous G. (2009) Changing Energy Requirements in the Mediterranean Under Changing Climatic Conditions. *Energies* 2, 805-815.
- Faggian P. (2015) Climate Change Projections for Mediterranean Region with Focus over Alpine Region and Italy. *Journal of Environmental Science and Engineering B* 4, 482-500.
- Giannakopoulos C., P. Hadjinicolaou, C. Zerefos, Demosthenous G. (2009) "Changing Energy Requirements in the Mediterranean Under Changing Climatic Conditions". *Energies* 2, 805-815.
- Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank AMG, Klok E.J., Jones P.D., New N. (2008) A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119.
- Huang J., Gurney K.R. (2016) Impact of climate change on U.S. building energy demand: sensitivity to spatiotemporal scales, balance point temperature, and population distribution. *Climatic Change* 137, 171-185.
- Kevin Baumert K., Selman M. (2003), Heating and Cooling Degree Days, World Resources Institute.
- Manera M., Marzullo A. (2005) Modelling the load curve of aggregate electricity consumption using principal components. *Environmental Modeling and Software* 20, 1389-1400.
- Marvuglia A., Messineo A. (2012) Using recurrent artificial neural networks to forecast household electricity consumption. *Energy Procedia* 14, 45.55.
- Nakićenović et al., (2000) Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Pachauri R.K., Allen M.R., Barros V.R. et al., (eds) (2014) Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Parkpoom S. and G.P. Harrison (2008) Analyzing the Impact of Climate Change on Future Electricity Demand in Thailand. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1441-1448.
- Piani C., Haerter J., Coppola E. (2010) Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology* 99, 187-192.
- Ranson M., Morris L., Kat-Rubin A. (2014) Climate Change and Space Heating Energy Demand: A Review of Literature. U.S. Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Economics, Working paper #14-07
- Siface D., Vespucci M.T., Gelmini A. (2013) Solution of the mixed integer large scale unit commitment problem by means of a continuous Stochastic linear programming model, *Energy Systems* 5, 269-284.
- Scapin S., Apadula F., Brunetti M., Maugeri M. (2016) High-resolution temperature fields to evaluate the response of Italian electricity demand to meteorological variables: an example of climate service for the energy sector. *Theoretical and Applied Climatology* (2016) 125:729-742
- Van Der Linden, P., Mitchell J. (2009) ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project. Exeter: Met Office Hadley Centre.
- Than S.P.S., Migdalska J. (2013) Cooling Degree Day Analysis as a Climate Impact Indicator for different locations of Poland and India. Proceedings of 2nd The IRES International Conference, Berlin, Germany, 13th June 2015, ISBN: 978-93-85465-28-4.
- Terna (2018) Documento di Descrizione degli Scenari. Edizione 2018. Terna s.p.a. e Gruppo Terna.
- Troccoli A., Debus L., Haupt S.E. (eds) (2014) Weather Matters for Energy. Springer.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato finanziato dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico nell'ambito dell'Accordo di Programma tre RSE S.p.A. e il Ministero dello Sviluppo Economico per le attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale, in conformità con il Decreto dell'8 Marzo, 2006. L'analisi effettuata è stata possibile grazie alla disponibilità di dati dagli archivi: ENSEMBLE, realizzato dal Progetto EU FP6 Integrated Project; E-OBS, European Climate Assessment and Data set (ECA&D, <http://eca.knmi.nl>); MESAN, sviluppato nell'ambito del Progetto "FP7/EURO4M. Il presente lavoro è stato presentato e oggetto di discussione nell'ambito del "Tavolo di Decarbonizzazione", coordinato dalla Presidenza del Consiglio dei Ministri, specificatamente del Gruppo 1 "Dati di input non tecnologici", nel sotto-gruppo di lavoro "gradi-giorno" coordinato da ISPRA. Si ringraziano i revisori per i loro commenti costruttivi. Si ringrazia l'Ing. Antonio Negri di RSE per le utili indicazioni.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2018 è sostenuta da:



 INGENNERIA
DELL'AMBIENTE



N. 4/2018



ecopneus
il futuro dei pneumatici fuori uso, oggi



www.ingegneriadellambiente.net

