



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

Dipartimento di Ingegneria Civile,
Ambientale e Meccanica

Atlante Climatico Trentino

Progetto:

**“Messa a punto di applicativi condivisi specifici per
la spazializzazione e la mappatura delle principali
variabili meteo-climatologiche sul territorio
del Trentino”**

Relazione finale

Ing. Lavinia Laiti, Ing. Lorenzo Giovannini, Prof. Dino Zardi

Gruppo di Fisica dell' Atmosfera

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

Università di Trento

8 gennaio 2016

Indice

Premessa.....	1
1. Introduzione	3
1.1 Il clima del Trentino.....	3
1.2 Le osservazioni meteo-climatologiche in Trentino	5
1.3 Le motivazioni e gli obiettivi del progetto	7
2 Metodi di spazializzazione delle variabili meteo-climatologiche.....	11
2.1 Metodi deterministici	12
2.1.1 Metodi di triangolazione e tassellatura.....	12
2.1.2 Metodi di tipo “spline”	13
2.1.3 Metodi di tipo Inverse Distance Weighting (IDW)	14
2.2 Metodi statistici	15
2.2.1 Metodi di regressione.....	15
2.2.2 Metodi geostatistici o di tipo “kriging”	15
2.3 Altri metodi.....	17
2.3.1 Metodi dinamici	17
2.3.2 Metodi ibridi.....	18
2.3.3 Metodi basati sull’esperienza dell’operatore	19
2.4 Altre considerazioni.....	20
3 Mappatura della temperatura	23
3.1 La temperatura in terreno complesso	23
3.2 Dati di temperatura disponibili	24
3.3 Metodi di mappatura della temperatura	26
3.4 Il metodo adottato per l’Atlante.....	27
3.5 Altre azioni.....	30
4 Mappatura della precipitazione.....	33
4.1 La precipitazione in terreno complesso	33
4.2 Dati di precipitazione disponibili	36
4.3 Metodi di mappatura della precipitazione.....	36

4.4 Mappe di precipitazione dei servizi meteorologici italiani	38
4.5 Il metodo adottato per l'Atlante.....	42
4.5.1 Il confronto tra metodi geostatistici.....	42
4.4.2 I risultati della mappatura	49
5 Mappatura di altre variabile meteo-climatiche	55
5.1 L'Atlante Solare del Trentino	55
5.1.1 La spazializzazione della radiazione solare	55
5.1.2 Altre attività.....	56
5.2 L'Atlante Eolico del Trentino	62
5.2.1 La mappatura della risorsa eolica.....	62
5.2.2 Altre attività.....	63
5.3 Analisi delle situazioni sinottiche e dei tipi di tempo.....	67
6 Conclusioni	73
Ringraziamenti	75
Bibliografia.....	77
Indice delle figure	83
Appendice.....	87

Premessa

La presente relazione tecnica finale descrive le attività svolte e i risultati conseguiti nell'ambito del progetto "Messa a punto di applicativi condivisi specifici per la spazializzazione e la mappatura delle principali variabili meteo-climatologiche sul territorio del Trentino". Il progetto è parte di un più ampio programma finalizzato alla realizzazione e alla pubblicazione dell'Atlante Climatico del Trentino (climatlas.fbk.eu), che è stato promosso in primo luogo dall'Osservatorio Trentino del Clima (www.climatrentino.it) e finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento tramite il Fondo per il cambiamento climatico. Lo scopo principale del presente progetto è quello di definire in maniera condivisa le procedure di interpolazione più appropriate per la spazializzazione delle principali variabili meteo-climatologiche sul territorio del Trentino, in vista del contestuale completamento e aggiornamento dell'interfaccia web del progetto, disponibile al link: climatlas.fbk.eu.

Storicamente l'interpolazione delle variabili meteo-climatologiche è stata sfruttata innanzitutto per la visualizzazione della distribuzione spaziale delle stesse. Recentemente essa ha assunto un'importanza ancora maggiore, legata alla crescente diffusione e domanda di dati in formato digitale, oltre al fatto che le mappe di variabili meteo-climatologiche costituiscono uno strumento necessario per effettuare le cosiddette operazioni di "downscaling", sia di set di misure provenienti da reti osservative di superficie, che di proiezioni e previsioni da modelli climatici e meteorologici, etc.

Il lavoro presentato è stato condotto sulla base della disponibilità di numerose serie di dati validati e omogenizzati già prodotte in passato, sia nell'ambito del progetto dell'Atlante Climatico che di altri progetti analoghi. Ci si è avvalsi inoltre della preziosa collaborazione di Meteotrentino, della Fondazione Bruno Kessler e della Fondazione Edmund Mach.

1. Introduzione

1.1 Il clima del Trentino

Il territorio della Provincia Autonoma di Trento (che coincide con la regione denominata Trentino) presenta una morfologia molto complessa, in particolare per la presenza di un elevato numero di valli caratterizzate da lunghezza, ampiezza, profondità e orientamento diversi (Fig. 1). Catene montuose, zone collinari, altipiani e laghi generano una notevole varietà climatica, accentuata ulteriormente dal fatto che la quota del terreno varia sul territorio trentino tra 65 m s.l.m. (Lago di Garda) e 3764 m s.l.m. (Monte Cevedale). Dal punto morfologico il Trentino è strutturato come un grande solco vallivo principale e centrale, quello della Val d'Adige, con asse nord-sud, dal quale si dipartono molte valli laterali come la Valsugana, la Valle dei Laghi e la Val di Non; troviamo poi le principali catene montuose, come il Gruppo del Brenta, le Dolomiti, il Gruppo dell'Adamello, il Lagorai, la catena Bondone-Baldo e le Alpi di Ledro.

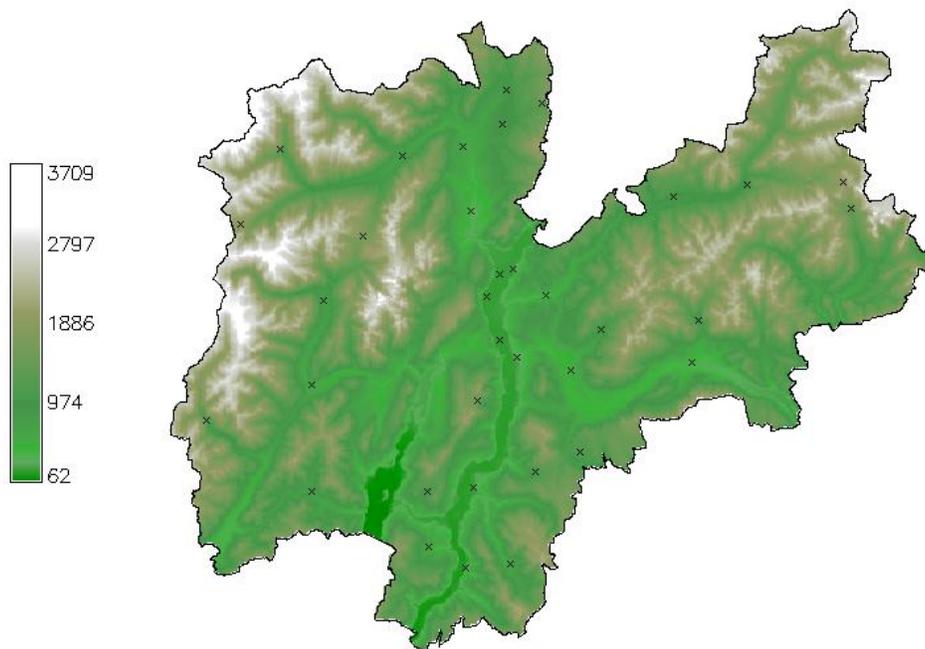


Figura 1. Rappresentazione dell'orografia del territorio della Provincia di Trento. I valori di elevazione del terreno sono espressi in m s.l.m. (vedi legenda).

L'area più elevata della regione è quella delle Alpi Retiche all'estremità nord-occidentale (Monte Cevedale), mentre la zona più bassa è la piana che fronteggia la costa settentrionale del Lago di Garda nella bassa Valle del Sarca.

Questa complessità crea una enorme varietà di situazioni climatiche e rende difficile la classificazione. Il clima del Trentino si può comunque suddividere in queste zone climatiche principali in funzione dell'andamento termico:

- a. le zone più basse (come la bassa Valle del Sarca, la Valle dei Laghi e la Val d'Adige) caratterizzate da inverni relativamente freddi e abbastanza nevosi, ed estati calde e temporalesche, spesso afose di giorno, con l'eccezione dell'Alto Garda dove i pomeriggi estivi sono piacevolmente rinfrescati dall'Ora del Garda, una brezza meridiana che apporta aria più fresca dal lago verso la terraferma, spingendosi oltre la fine della Valle del Sarca, fino in Val d'Adige a nord della città di Trento.
- b. Le valli laterali, come la Val di Non e la Valsugana, con un clima con temperature più moderate d'estate e leggermente più fredde d'inverno.
- c. Le conche fredde e gli avvallamenti posti fra 500 e 1000 m s.l.m., come il Bleggio e il fondovalle della Val di Fiemme offrono estati miti e inverni più rigidi.
- d. Le zone di montagna più alte oltre i 1300-1600 m s.l.m., con un tipico clima montano caratterizzato da estati fresche o miti e piovose con frequenti temporali, e da inverni freddi e alquanto nevosi.

Per quanto concerne le precipitazioni si osservano differenze notevoli tra le diverse parti della regione. Le aree più piovose sono quelle meridionali e sud-occidentali, ovvero quelle più esposte ai flussi di aria umida provenienti da sud e alle perturbazioni provenienti generalmente da ovest e sud-ovest. Al contrario, invece, le zone più protette e meno esposte ai flussi meridionali, come le valli di Fiemme e Fassa, ricevono mediamente meno precipitazioni. Importanti differenze si notano anche nel regime pluviometrico, che nelle zone più vicine alle Prealpi (Val d'Adige, Valle del Chiese, Alto Garda e Valsugana) è caratterizzato da due massimi di precipitazione, in primavera e autunno, e due minimi, in estate e soprattutto in inverno. Le zone più lontane dalla Pianura Padana e

caratterizzate dalle quote più elevate mostrano invece un regime più propriamente “alpino”, con un massimo di precipitazione stagionale piuttosto evidente in estate, dovuto all’intensificazione dell’attività convettiva e ai frequenti eventi temporaleschi (www.climatrentino.it).

1.2 Le osservazioni meteo-climatologiche in Trentino

Una tale varietà morfologica e climatica richiede uno sforzo di monitoraggio delle variabili meteo-climatiche decisamente intenso rispetto alla non elevatissima estensione areale della regione. Sul territorio del Trentino sono effettivamente attive diverse reti di monitoraggio ambientale per la raccolta di dati meteorologici, agrometeorologici, nivologici, idrologici, etc. Queste reti di misura sono attualmente gestite da diverse istituzioni, in particolare da Meteotrentino (www.meteotrentino.it), il servizio meteorologico del Dipartimento di Protezione Civile della Provincia Autonoma di Trento, e dall’Unità Sistema Informativo Geografico (meteo.iasma.it) del Centro Trasferimento Tecnologico della Fondazione Edmund Mach.

Tuttavia, per quanto dense di stazioni e distribuite, le reti di misura meteo-climatologiche del Trentino non coprono uniformemente il territorio della regione in esame (Fig. 2 e 3). Come già accennato, quest’ultimo presenta un’elevata complessità orografica; per questa ragione i gradienti delle variabili di interesse sono spesso molti marcati, e si sviluppano sia in direzione verticale, quindi rispetto alla quota del terreno, che in direzione orizzontale, ovvero rispetto a longitudine e latitudine (Frei e Schär, 1998). La densità delle stazioni meteorologiche appare molto più elevata in generale nelle aree di fondovalle, specialmente per quanto concerne la rete agrometeorologica gestita dalla Fondazione E. Mach per ovvie ragioni, mentre le aree più elevate, meno intensamente antropizzate e meno facilmente accessibili, risultano relativamente sguarnite di siti di osservazione. Inoltre, da un punto di vista climatologico, la densità effettiva di stazioni con serie temporali sufficientemente lunghe e regolari, tali da essere utilizzabili per compiere valutazioni climatologicamente significative, viene ulteriormente ridotta rispetto a quella di partenza. Ad esempio, a causa di vincoli legati a copertura temporale e qualità dei dati, per la realizzazione dell’Atlante Solare del Trentino si sono selezionate solo 25 stazioni radiometriche a fronte di un numero totale di stazioni teoricamente disponibili superiore a 100 (Laiti et al., 2014a,b).

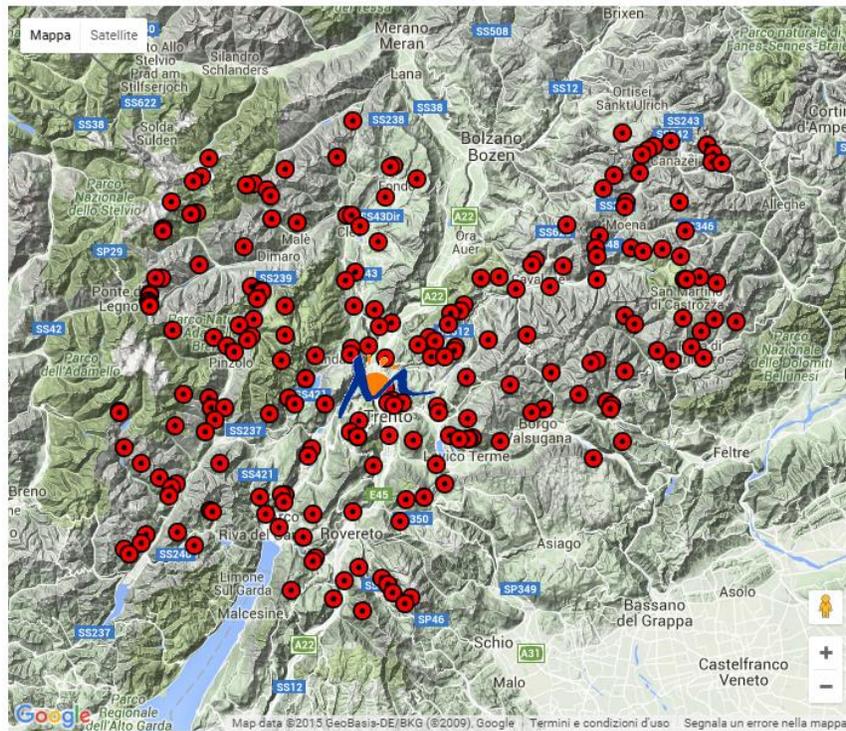


Figura 2. Mappa delle stazioni che compongono la rete osservativa meteo-climatologica gestita da Meteotrentino (fonte: www.meteotrentino.it/dati-meteo/stazioni/mappe/gmapstz.aspx?ID=205).

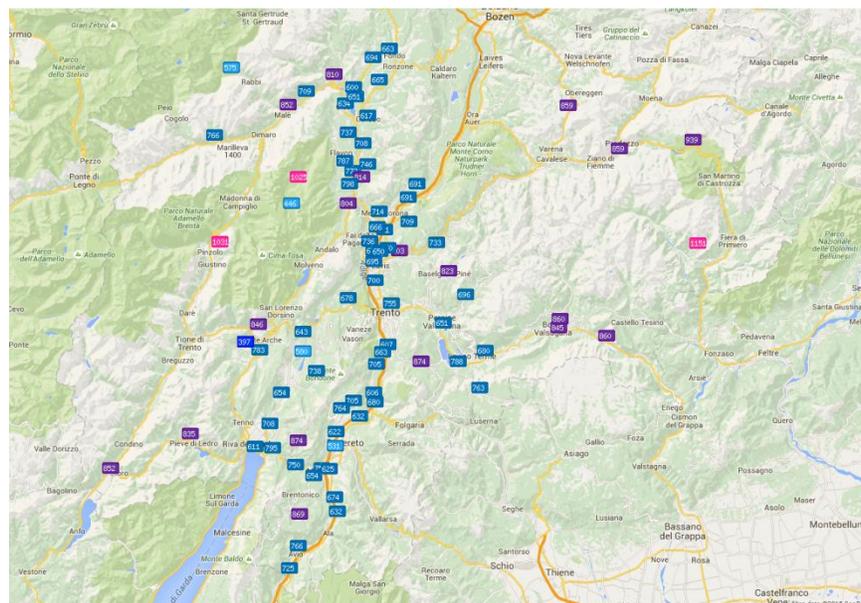


Figura 3. Mappa delle stazioni che compongono la rete osservativa meteo-climatologica gestita dalla Fondazione Edmund Mach (valori cumulati di pioggia in mm per l'anno 2015 al 12/11/2015; fonte: meteo.fmach.it/meteo/mappa.php).

Questo genere di limiti strutturali può essere talvolta compensato, almeno parzialmente, dall'utilizzo di sistemi di telerilevamento, come i radar o i satelliti meteorologici. Tuttavia, a fronte dell'indubbio vantaggio di assicurare una copertura spaziale continua del territorio monitorato, tali sistemi di osservazione delle variabili meteo-climatologiche presentano altresì alcuni svantaggi. Tra questi, la risoluzione spaziale non sempre adeguata, la risoluzione temporale ridotta, la necessità di rielaborare i dati con algoritmi complessi che richiedono calibrazione ed esperienza. Questo implica che non sempre le osservazioni da telerilevamento siano in grado di riprodurre adeguatamente i processi in atto con l'accuratezza richiesta, specialmente per un territorio così complesso. Si pensi ad esempio alle problematiche dei database satellitari di radiazione nelle aree coperte da neve, dove gli algoritmi di interpretazione faticano a discriminare correttamente le superfici delle nubi e quelle coperte da neve e ghiaccio. Per il Trentino è attivo un radar meteorologico situato a 1866 m s.l.m. sul Monte Macaion, nel Comune di Fondo in Val di Non, al confine tra le Province di Trento e Bolzano (le immagini delle precipitazioni rilevate dal radar sono disponibili al seguente link: www.meteotrentino.it/dati-meteo/radar/last_rain_image.aspx?ID=27). Tale strumento, gestito in collaborazione da Meteotrentino e dall'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano, è un radar di tipo Doppler in banda C ed ha un range operativo massimo di circa 120 km, consentendo il monitoraggio dei territori di entrambe le province. Purtroppo però, in un ambiente tanto complesso la scansione dell'atmosfera incontra molti ostacoli e schermature orografiche, creando parecchi limiti alle immagini radar acquisite, specialmente lontano dal punto di installazione. Un ulteriore contributo alla determinazione delle distribuzioni delle variabili meteo-climatologiche può infine essere fornito dai modelli, come i modelli meteorologici numerici nel caso dell'Atlante Eolico del Trentino (Giovannini et al., 2014). L'integrazione e la fusione di osservazioni da diverse fonti e risultati da modelli offre attualmente ampie prospettive nella determinazione delle distribuzioni delle variabili meteo-climatologici.

1.3 Le motivazioni e gli obiettivi del progetto

L'interpolazione delle variabili meteo-climatologiche è stata da tempo utilizzata per la realizzazione di mappe finalizzate alla visualizzazione della distribuzione spaziale delle variabili stesse, ma ha recentemente

assunto una sempre maggiore importanza, legata principalmente al fatto che costituisce anche uno strumento necessario per il down-scaling (ioè la rappresentazione a più elevata risoluzione spaziale) di set di misure originariamente provenienti da reti osservative di superficie, da modelli numerici climatici e meteorologici. E' noto che i criteri di spazializzazione dei dati meteo-climatologici possono differire anche significativamente per le diverse variabili meteo-climatologiche, e che la loro mappatura su un territorio topograficamente e climaticamente complesso, come quello in esame, richiede procedure specifiche e dedicate. Per il territorio della Provincia di Trento varie soluzioni sono state adottate nel corso del tempo per la spazializzazione delle diverse variabili, in particolare di temperatura e precipitazione, da parte di diversi soggetti e in relazione a finalità diverse. In particolare, al momento dell'avvio di questo progetto sono già disponibili le seguenti mappe meteo-climatologiche per il territorio di interesse:

- mappe di temperatura dell'aria media mensile, stagionale e annua per i trentenni di riferimento 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010, elaborate con la tecnica di spazializzazione "Optimal Interpolation" (Uboldi et al., 2008) per l'Atlante Climatico del Trentino (disponibili alla pagina climatlas.fbk.eu/view/mappe);
- mappe di precipitazione media mensile, stagionale e annua per i trentenni di riferimento 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010, elaborate con la tecnica di spazializzazione "Ordinary Kriging" (Journel e Huijbregts, 1978) per l'Atlante Climatico del Trentino (disponibili alla pagina climatlas.fbk.eu/view/mappe);
- mappe orarie di temperatura e umidità relativa dell'aria, elaborate con la tecnica di spazializzazione "Optimal Interpolation" e diffuse in tempo reale (disponibili alla pagina www.meteotrentino.it/dati-meteo/stazioni/mappe/mappe.aspx?ID=130);
- mappe orarie e giornaliere di precipitazione, elaborate con la tecnica di spazializzazione "Ordinary Kriging" e diffuse in tempo reale (disponibili alla pagina www.meteotrentino.it/dati-meteo/stazioni/mappe/mappe.aspx?ID=130).
- mappe giornaliere di copertura nevosa da immagini satellitari (disponibili alla pagina <http://www.meteotrentino.it/neveghiacci/criopat/criopat.aspx?ID=237>; Melgani e Bruzzone, 2004).

Lo sviluppo dell'interfaccia web CLIMATLAS (accessibile alla pagina climatlas.fbk.eu; Fig. 4), da parte del gruppo Predictive Models for Biomedicine & Environment della Fondazione B. Kessler (mpba.fbk.eu) nell'ambito del progetto Atlante Climatico del Trentino, ha recentemente riportato all'attenzione la necessità di una definizione delle procedure più appropriate per gli scopi sopra citati. Questa relazione espone le azioni intraprese in questa direzione e i risultati ottenuti, anche nella prospettiva del completamento e dell'integrazione della suddetta interfaccia web dell'Atlante. Il progetto si avvantaggia della disponibilità di numerose serie di dati validati e omogenizzati, già prodotte nell'ambito del progetto dell'Atlante, ma anche di altri progetti analoghi svolti in passato.

Tra i risultati attesi per questa nuova attività ci sono:

- l'individuazione delle procedure di spazializzazione più adeguate per mappare sul territorio trentino le variabili temperatura, precipitazione, radiazione e altre variabili, in relazione a diversi intervalli temporali e periodi di riferimento (scala giornaliera, mensile, annuale, ...);
- la condivisione tra i diversi soggetti coinvolti nel progetto dell'Atlante Climatico del Trentino dei criteri e dei metodi utilizzati per l'analisi dei dati e per la loro rappresentazione spaziale;
- l'integrazione e la valorizzazione di informazioni provenienti da stazioni al suolo, sistemi di telerilevamento (radar meteorologico, satellite) e modelli numerici;
- la produzione di linee guida contenenti le procedure e i parametri di riferimento necessari all'adozione operativa degli strumenti di spazializzazione individuati;
- lo sviluppo di applicativi open source per la spazializzazione delle variabili in ottemperanza alle linee guida tracciate.

Le potenziali ricadute delle attività sopra elencate comprendono tra le altre quelle riportate di seguito:

- il potenziamento delle capacità di valutazione delle variabili meteorologiche nelle aree del territorio provinciale non direttamente coperte dalla presenza di stazioni di misura;
- la creazione di strumenti per la validazione delle osservazioni stesse, grazie all'applicazione in modalità di controllo incrociato degli algoritmi di spazializzazione a dati provenienti da stazioni di misura vicine;

- la facilitazione della diffusione delle informazioni relative all'Atlante Climatico e di alcune nozioni climatologiche di base al pubblico, grazie alla presentazione di mappe climatiche;
- un supporto alle attività di ottimizzazione e progettazione della rete osservativa stessa, mediante l'identificazione delle aree non adeguatamente monitorate in vista dell'eventuale integrazione, nonché delle situazioni di ridondanza in vista di eventuali eliminazioni;
- la fornitura di mappe di variabili meteo-climatiche a supporto di diverse applicazioni (come la pianificazione territoriale e la progettazione sostenibile, la valutazione di risorse idriche, energetiche, agricole e forestali, ...).



Figura 4. L'attuale home page dell'interfaccia web dell'Atlante Climatico del Trentino (climatlas.fbk.eu).

2 Metodi di spazializzazione delle variabili meteo-climatologiche

I metodi di spazializzazione o di interpolazione sono in generale delle tecniche numeriche elaborate per ricostruire la variabilità non risolta dalla rete di punti sui quali si effettua il campionamento, che è per definizione limitato a un insieme discreto. Intuitivamente, i punti mediamente più vicini tra loro mostrano più valori simili rispetto a punti lontani tra loro, dal momento che le discontinuità sono piuttosto rare in natura. Si parla propriamente di interpolazione quando la funzione (i valori) stimata passa per i punti noti (le misure), ovvero quando abbiamo a che fare con un metodo cosiddetto “esatto”, mentre parliamo di approssimazione nel caso nel quale minimizziamo le differenze rispetto ai valori misurati nei punti noti, ma la funzione stimata non passa necessariamente per tali punti.

Il presente capitolo intende fornire una breve ma esaustiva rassegna dei metodi di interpolazione correntemente e comunemente utilizzati in letteratura per la spazializzazione delle principali variabili meteo-climatologiche, sia in ambito scientifico che nella pratica operativa dei servizi meteorologici e degli operatori privati del settore. Nello specifico, si rammenta che tali attività sono state in passato l’oggetto e il focus di alcune azioni COST del settore “Earth System Science and Environmental Management”:

- Azione COST 718: “Meteorological Applications for Agriculture” (agromet-cost.bo.ibimet.cnr.it); in particolare il Working Group 1 “Availability and Quality of Input Weather Data”, tra gli obiettivi del quale c’era la realizzazione di un confronto tra tecniche di interpolazione spaziale.
- Azione COST 719: “The use of geographic information systems in Climatology and Meteorology” (projects.knmi.nl/cost719), in particolare il Working Group 2; lo scopo dell’Azione, che si è svolta tra il 2001 e il 2006, consisteva nel valutare la disponibilità e l’accessibilità di database climatologici e meteorologici, e nello stimolare la cooperazione europea per lo sviluppo di applicazioni GIS (Geographical Information System) per la ricerca e la gestione dell’informazione meteorologica e climatologica, oltre che ambientale. Di particolare interesse per gli scopi del presente

progetto Atlante Climatico del Trentino sono in particolare due casi di studio affrontati nell'azione: "Spatialisation of Temperature in Alpine Regions" e "Mapping the Precipitation Using Combined Information from Satellite Data, Mesoscale Forecast Models and Ground Measurements (Synoptic and Climatologic). A GIS Approach".

I report tecnici di queste Azioni COST sono stati presi in considerazione nella stesura di questa relazione, assieme a molte altre fonti da letteratura scientifica che affrontano le problematiche di interesse.

In generale si ricorda che i metodi di interpolazione spaziale possono essere classificati in due gruppi principali: deterministici e statistici (o stocastici). I primi generano una superficie continua (ovvero un campo bidimensionale della variabile di interesse) a partire dalle misure raccolte presso punti di osservazione vicini sulla base di relazioni esplicite, i cui parametri possono avere un significato fisico. I secondi si basano invece sulle teoria dei processi stocastici e sul concetto di variabile e realizzazione stocastica; il legame fra punti vicini è talvolta espresso grazie ad un legame statistico (tipicamente la covarianza), che può anche non avere un esplicito significato fisico. Esistono poi tutta una serie di metodi che raccoglie quelle tecniche che non appartengono alle due categorie citate. Inoltre, possiamo distinguere tra metodi di interpolazione globali e locali, a seconda che tutte le osservazioni oppure solo quelle raccolte presso i punti più vicini siano utilizzate per la stima (Tveito et al., 2006; Dobesch et al., 2007). Di seguito sono presentate in maniera concisa le differenti tecniche di spazializzazione disponibili, a seconda della tipologia di appartenenza del metodo ma anche delle variabili di applicazione.

2.1 Metodi deterministici

2.1.1 Metodi di triangolazione e tassellatura

Questa tipologia di metodi prevede che il dominio di interpolazione venga suddiviso in una serie di poligoni (o poliedri), per ognuno dei quali la funzione che approssima la variabile meteo-climatologica è definita sulla base dei valori osservati presso le stazioni circostanti. Questi metodi includono il metodo di triangolazione di Delaunay (Delaunay, 1934) o dei poligoni di Voronoi (Voronoi, 1907), anche detti di Thiessen nelle applicazioni collegate all'idrologia e alla meteorologia (Thiessen, 1911), molto utilizzato in idrologia in passato per la spazializzazione della

precipitazione; questo metodo assegna il valore del dato più vicino ad ogni punto di griglia di interpolazione, tracciando regioni a valore costante attorno ai punti delle osservazioni (“nearest neighbors”). Una variante più raffinata consiste nell’assegnare ad ogni punto un valore ricavato come media delle osservazioni pertinenti (“natural neighbors”), pesata in base all’area di pertinenza associata.

I metodi di tassellatura si basano unicamente sulla configurazione geometrica delle stazioni di osservazione, e sono molto adatti a variabili cosiddette “categoriche”. Si tratta di un approccio semplice con soluzione univoca (interamente determinata dalla posizione dei punti), facilmente automatizzabile, che però non fornisce indicazioni sull’errore di stima e assume implicitamente una distribuzione omogenea e isotropa della variabile di interesse. In sintesi i metodi di triangolazione e tassellatura sono metodi deterministici che forniscono un interpolatore locale ed esatto, ma non forniscono alcuna stima dell’errore di interpolazione o di stima. Sono caratterizzati da un basso costo computazionale e sono particolarmente adatti ai dati di tipo categorico (non numerico).

2.1.2 Metodi di tipo “spline”

Consiste nell’interpolare o approssimare i dati con funzioni (tipicamente polinomiali) a tratti. L’interpolazione o approssimazione è data da un insieme di funzioni definite localmente e opportunamente raccordate. Il raccordo tra le funzioni a tratti è realizzato imponendo determinati vincoli sulle singole funzioni, tipicamente imponendo l’uguaglianza delle derivate fino ad un determinato ordine alla frontiera di ciascun intervallo. Pertanto, riassumendo questo metodo consiste nell’individuare un set di funzioni che interpolino o approssimino i valori osservati rispettando uno specifico criterio di “smoothness” (Creutin and Obled, 1982). Le funzioni spline più comunemente utilizzate si chiamano “thin plate splines” (TPS) e sono basate su una procedura di cross-validazione generalizzata per individuare il set di superfici ottimali. Esempi di applicazione di TPS a dati di precipitazione possono essere rintracciati in Creutin and Obled (1982), Hutchinson (1995, 1998a, 1998b), Tait et al. (2005).

In sintesi i metodi di tipo spline sono metodi deterministici che forniscono un interpolatore locale ed esatto, ma non forniscono alcuna stima dell’errore di interpolazione o di stima. Sono caratterizzati da un costo computazionale basso/moderato e sono particolarmente adatti alle

variabili che presentano una distribuzione “liscia”, caratterizzata da variazioni molto graduali.

2.1.3 Metodi di tipo Inverse Distance Weighting (IDW)

In questa tipologia di metodo di interpolazione il valore stimato è ottenuto grazie alla combinazione lineare pesata dei valori osservati presso le stazioni vicine al punto di stima tramite coefficienti che dipendono dalla distanza tra il punto di stima e quello di osservazione. Più precisamente, i pesi vengono assegnati in maniera proporzionale all'inverso della distanza tra punti (da qui “Inverse Distance Weighting”, abbreviato in IDW) che viene elevata ad un certo esponente (generalmente compreso tra 0 e 2) oppure che costituisce l'argomento di una funzione esponenziale, anche in questo caso elevata a un certo esponente. Questo metodo implementa direttamente l'idea della maggiore o minore influenza dei valori campionati in funzione della distanza dal punto di stima (Shepard, 1968). La scelta dell'esponente o della funzione con la quale pesare le diverse osservazioni influisce sul risultato finale (un esponente pari a 2 rappresenta la scelta più comunemente adottata, anche detta Inverse Squared Distance o ISD), assieme alla scelta della distanza massima o del numero massimo di stazioni da utilizzare per la stima (ovvero forma e dimensioni della finestra mobile di selezione delle osservazioni o “searching neighborhood”). Tipicamente il numero di osservazione coinvolte nell'interpolazione costituisce un compromesso tra precisione dell'interpolazione e carico computazionale. In ogni caso, per consentire stime prive di bias sistematici (conservando quindi la media globale del campo della variabile), la somma dei pesi deve essere pari a 1. Questa tipologia di metodi di interpolazione è particolarmente sensibile alla presenza di cluster nei dati, inoltre risente pesantemente dell'eventuale presenza di trend globali nei dati.

In sintesi i metodi di tipo IDW sono metodi deterministici che forniscono un interpolatore locale ed esatto, ma non forniscono alcuna stima dell'errore di interpolazione o di stima. Sono caratterizzati da un costo computazionale basso e sono particolarmente adatti alle variabili che presentano una distribuzione “liscia” con variazioni molto graduali.

2.2 Metodi statistici

2.2.1 Metodi di regressione

Questi metodi consistono nell'applicazione di un'analisi di regressione, effettuata ad esempio grazie a metodi ai minimi quadrati, per ottenere una superficie risultante che approssimi al meglio le osservazioni, ovvero minimizzi la differenza tra le osservazioni e le stime corrispondenti. Pertanto non si tratta di interpolazione esatta (cioè di interpolazione che restituisce esattamente i valori misurati nei punti di osservazione), ma più propriamente di approssimazione. Tali regressioni sono generalmente di tipo polinomiale, e sono spesso utilizzate in fase preliminare nell'ambito di tecniche di interpolazione più complesse, con lo scopo di decomporre e osservare le osservazioni da interpolare in un termine di trend globale (deterministico) e in una componente residuale locale (da interpolare a sua volta con un metodo di tipo "locale"). Tale approccio modella bene gli andamenti globali dei dati, anche con polinomi di basso ordine, e dà utili indicazioni sul grado di approssimazione, ma non restituisce sempre valori ragionevoli al di fuori dell'area coperta dalle osservazioni; inoltre l'utilizzo di metodi ai minimi quadrati presuppone una distribuzione normale degli scarti e non costituisce un criterio di stima robusto. Validi esempi di applicazione di questi metodi possono essere trovati in Ninyerola et al. (2000) e Brunetti et al. (2009, 2012).

In sintesi i metodi di regressione sono metodi stocastici che forniscono un interpolatore globale non esatto (cioè approssimano le osservazioni), ma non forniscono alcuna stima dell'errore di interpolazione o di stima. Sono caratterizzati da un costo computazionale moderato e sono molto adatti alla rimozione di trend globali (spesso con un significato fisico) prima dell'applicazione di un altro metodo ai residui (o errori, che spesso presentano una distribuzione gaussiana).

2.2.2 Metodi geostatistici o di tipo "kriging"

I metodi di interpolazione geostatistica sono stati originariamente sviluppati nell'ambito dell'analisi spaziale per la valutazione delle risorse minerarie, e recentemente sono stati diffusamente applicati ad altri contesti nelle scienze ambientali. Le basi teoriche della geostatistica sono state descritte in dettaglio da molti autori negli anni (ad esempio Journel e Huijbregts, 1978; Isaaks e Srivastava, 1989; Cressie, 1991).

I metodi geostatistici cercano di affrontare alcune delle questioni che gli altri metodi di interpolazione non risolvono, ad esempio come determinare la dimensione, la forma e l'orientamento più adeguati per la finestra mobile di interpolazione, come determinare nella maniera migliore i pesi delle singole osservazioni in funzione della loro distanza dal punto di stima, o come stimare la precisione dei valori ricavati per interpolazione, il tutto sempre allo scopo di ottenere delle stime ottimali. Alla base dei metodi geostatistici c'è l'ipotesi di poter trattare la variabile da stimare (meteo-climatica in questo caso) come un processo stocastico stazionario al secondo ordine (media e varianza entrambe stazionarie), potendo dividere il segnale (autocorrelato) dal rumore (non correlato), attraverso la conoscenza della funzione di covarianza del segnale. Nel "kriging" (dall'autore del primo contributo allo sviluppo di queste tecniche: Krige, 1951) si utilizzano funzioni teoriche di covarianza che variano con la posizione (distanza) reciproca del punto di stima e delle misure vicine. I parametri di tali funzioni teoriche, dette "semivariogrammi", vengono stimati a partire dalle osservazioni stesse, spesso con metodi ai minimi quadrati. Anche per i metodi geostatistici la stima consiste in una combinazione lineare pesata delle osservazioni vicine. Nella procedura di stima si impongono inoltre altri vincoli, tra i quali un errore sistematico nullo (ovvero la somma unitaria dei pesi delle osservazioni) e la minimizzazione della varianza dell'errore della stima (Journel e Huijbregts, 1978). Quest'ultimo aspetto fa sì che il kriging sia particolarmente adatto alla progettazione e all'ottimizzazione delle reti di misura, poiché permette di stimare la distribuzione spaziale dell'errore di stima. Il kriging, in particolare il più comunemente applicato "ordinary kriging" (Journel e Huijbregts, 1978), costituisce in questo senso un interpolatore ottimale dal punto di vista teorico, ed è anche in grado di fornire una stima dell'errore che affligge i valori interpolati. È però tipicamente necessario rimuovere previamente trend dominanti presenti nei dati ("residual kriging"), o applicare un'appropriata tipologia di kriging, più sofisticata (come lo "universal kriging" o il "kriging with external drift"; Journel e Huijbregts, 1978; Ahmed and de Marsily, 1987; Hudson and Wackernagel, 1994).

Il maggior vantaggio del kriging risiede nel fatto che non si usa solo l'informazione dalle stazioni vicine, ma anche la conoscenza della struttura spaziale della correlazione tra osservazioni. Per piccoli domini di

interesse, dotati di una fitta rete osservativa, il kriging non fornisce alcun miglioramento sensibile rispetto a metodi più semplici, mentre nelle regioni con osservazioni così scarse da risultare non correlate, esso si riduce a fornire la media locale della variabile di interesse. Alcune di queste limitazioni possono essere risolte utilizzando tecniche kriging più sofisticate, come accennato sopra. In sintesi i metodi di tipo kriging sono metodi stocastici che forniscono un interpolatore locale ed esatto, oltre a fornire una stima precisa sia della funzione che dell'errore di interpolazione o di stima. Sono però caratterizzati da un costo computazionale molto elevato. Si prestano bene all'interpolazione di dati con distribuzione stazionaria (cioè non affetti da trend dominanti), tipicamente ai residui di una precedente operazione di regressione. Purtroppo la loro applicazione richiede la verifica di molte ipotesi vincolanti sulla natura dei dati.

2.3 Altri metodi

2.3.1 Metodi dinamici

Questo gruppo di metodi di interpolazione poggia su una base fisica molto più consistente di quella dei precedenti metodi. Infatti, per metodi di interpolazione dinamici si intendono quei metodi basati sull'utilizzano di modelli che riproducono più o meno nel dettaglio i fenomeni fisici che governano la distribuzione della variabile di interesse. Le tecniche precedentemente introdotte, al contrario, mirano a riprodurre gli effetti dei fenomeni fisici senza affrontare esplicitamente le equazioni e i meccanismi che governano i fenomeni stessi (si consideri, ad esempio, la modellazione del gradiente verticale di temperatura con la quota tramite la regressione ad una funzione lineare o parametrica di qualche genere). Questa tipologia di metodi si rivela particolarmente preziosa quando le osservazioni meteo-climatologiche sono insufficienti per l'elaborazione di mappe accurate.

Esempi di questo tipo di metodi sono presenti anche nell'Atlante Climatico del Trentino. In particolare, come verrà spiegato nel dettaglio più avanti (sezioni 5.1 e 5.2), l'Atlante Solare e l'Atlante Eolico sono stati realizzati rispettivamente grazie ad un modello di radiazione in condizioni di cielo sereno (che riproduce tramite opportune parametrizzazioni la fisica della propagazione, dell'assorbimento e della diffusione della radiazione solare in atmosfera e al suolo) e a due modelli

atmosferici numerici di differente complessità utilizzati in cascata. Si noti che è possibile utilizzare in maniera combinata i cosiddetti metodi dinamici e i metodi descritti in precedenza. Infatti, l'Atlante Solare del Trentino combina un modello di radiazione con un metodo di interpolazione di tipo geostatistico, a sua volta accoppiato a un metodo di regressione (kriging residuale con trend verticale lineare) per la mappatura della radiazione solare al suolo, a partire dalle osservazioni reali e puntuali di radiazione solare.

2.3.2 Metodi ibridi

Da quanto si evince dai paragrafi precedenti, esiste anche un'altra categoria di metodi di interpolazione, quella dei cosiddetti "metodi ibridi", che derivano dall'accoppiamento o dalla combinazione in cascata di metodi che appartengono alle famiglie di metodi già presentate.

L'approccio ibrido più comune (ampiamente citato nei paragrafi precedenti) è quello di utilizzare in fase preliminare un metodo di regressione per la modellazione e la rimozione del trend dominante presente nelle osservazioni (globale ma anche locale, se le caratteristiche e la densità del dataset ne permettono la stima in modalità locale), applicando in seguito un altro metodo (tipicamente un kriging ordinario) per la mappatura dei residui. La somma del trend (calcolabile e quindi definito per ogni nodo della griglia di interpolazione) al campo di anomalia locale (ottenuto dall'interpolazione delle differenze tra le osservazioni originarie e il trend) restituisce i valori finali della variabile di interesse. Tale metodo è denominato "residual kriging" o "detrended kriging" (in italiano "kriging residuale") ed è comunemente usato per variabili come temperatura e precipitazione in domini caratterizzati da topografia complessa.

Un approccio simile, ma concettualmente diverso, è quello di adottare un campo di valori di background o di "first guess" fornito da un metodo dinamico (modello fisico), come già prospettato sopra nel caso dell'Atlante Solare del Trentino. A tali valori di partenza vengono sommate le anomalie locali stimate grazie ad altri metodi di interpolazione, come metodi geostatistici o metodi di tipo IDW. Nel caso dell'Atlante Solare è stato utilizzato un modello di radiazione solare in condizioni "clear-sky" per la stima della radiazione massima teorica, unitamente ad un kriging residuale per la stima dei coefficienti di riduzione al suolo. Il modello di radiazione utilizzato è fortemente

parametrizzato e schematizza tramite sole equazioni algebriche i fenomeni di attenuazione della radiazione in atmosfera. Possono però essere adottati con profitto come valori di background anche tutti quei campi meteo-climatologici che rappresentano le uscite di un modello numerico atmosferico completo basato su equazioni differenziali e sulla loro integrazione.

Una scelta ancora diversa è rappresentata dall'utilizzo di osservazioni effettuate in remoto (da satellite o da radar meteorologico), tipicamente disponibili con scarsa risoluzione, ma con copertura spaziale continua, come punto di partenza per la realizzazione di mappe a più alta risoluzione grazie all'integrazione delle anomalie segnalate dalle osservazioni puntuali presso le stazioni di superficie.

2.3.3 Metodi basati sull'esperienza dell'operatore

Un ulteriore contributo alle tecniche di interpolazione ibride può arrivare dalla conoscenza e dall'esperienza di chi si occupa di climatologia e conosce profondamente il territorio, ovvero degli esperti. Un esempio di metodo di interpolazione che coinvolge direttamente questa preziosa risorsa è PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model; Daly et al. 1994, 2002), un algoritmo che combina un approccio statistico con l'apporto umano esperto. In particolare PRISM implementa una regressione pesata tra osservazioni meteo-climatologiche puntuali e un set di parametri morfologici, tra i quali l'elevazione del terreno (che esplica l'influenza dominante), la distanza dai grandi corpi idrici e le cosiddette "facets", ovvero delle categorie che inglobano le informazioni su esposizione e pendenza delle superfici. In terreno complesso questi ultimi aspetti sono particolarmente rilevanti, in quanto i pattern spaziali delle variabili climatiche sono spesso definiti da barriere, ostruzioni e pendenze topografiche, dando vita a un mosaico di regimi climatici differenti. Le "facets" possono essere determinate a diverse scale spaziali, per esempio si può distinguere tra aree sottovento e sopravvento rispetto a una catena montuosa (per la precipitazione), oppure versanti di una valle esposti a nord o a sud (per la radiazione solare). I pesi della regressione vengono assegnati raggruppando le stazioni in base alle caratteristiche topografiche e morfologiche (anche in base alla "facet" di appartenenza). Inoltre un modello a due strati è adottato per l'atmosfera, suddividendola in strato limite (inferiore) e atmosfera libera (superiore), permettendo ad esempio la modellazione delle inversioni termiche (Daly et al. 2002). Tali

parametrizzazioni e i pesi diversi che ne derivano per le diverse stazioni rappresentano l'apporto legato all'esperienza e alla conoscenza umana. Un esempio di mappe di precipitazione ottenuto grazie a PRISM è l'Atlante Idrologico della Svizzera (Schwarb et al. 2001a, 2001b).

2.4 Altre considerazioni

Come esposto nei paragrafi precedenti, sono disponibili numerosissime scelte diverse per la mappatura delle diverse variabili meteo-climatologiche, anche in relazione al diverso intervallo temporale di riferimento e di base climatologica. Una scelta consapevole e ragionata del miglior algoritmo di mappatura deve basarsi sul test di diversi approcci e sul confronto dei risultati ottenuti (vedi più avanti). Alcuni requisiti di base esulano dal metodo di interpolazione, come il fatto che le osservazioni devono essere previamente sottoposte a controlli di qualità e omogeneità. In questa fase appaiono particolarmente utili e significativi (quando disponibili) report tecnici che documentino interventi di manutenzione, sostituzione, spostamento dei sensori e delle stazioni meteorologiche, oltre ai cosiddetti metadati. Inoltre è raccomandabile prestare molta attenzione ad alcuni aspetti specifici connessi tra loro, che devono essere necessariamente armonizzati, come sono i parametri specifici dei metodi di mappatura (che possono avere bisogno di aggiustamenti e tarature dedicati), il numero e la densità delle osservazioni nello spazio e nel tempo, la risoluzione spaziale finale desiderata e ragionevolmente raggiungibile, la natura stessa della variabile di interesse e la distribuzione dei valori assunti dalle osservazioni, anche in relazione a caratteristiche morfologiche della regione di analisi, il periodo climatologico di riferimento, il periodo temporale di riferimento, la fisica che governa il fenomeno di interesse. I dettagli sopra possono guidare la scelta e l'applicazione del metodo di interpolazione più adeguato e portare ad escluderne altri, anche a priori. Ad esempio, differenti densità della rete osservativa possono corrispondere a diversi metodi, più sofisticati quando vi sono meno stazioni, più semplici quando ve ne sono molte. Ancora, alcuni metodi possono non essere adatti a variabili limitate superiormente o inferiormente. Allo stesso modo osservazioni orarie, giornaliere e mensili della stessa variabile possono richiedere approcci differenti, così come osservazioni istantanee mappate in "tempo reale" e osservazioni climatologiche, cioè relative a un periodo "storico".

Per migliorare la qualità e incrementare l'accuratezza dei risultati di interpolazioni spaziali è spesso raccomandabile (se non assolutamente necessario) includere eventuali informazioni ausiliarie o addizionali nelle procedure stesse di mappatura. Esempi di informazioni ausiliarie, disponibili con una densità superiore a quella delle osservazioni originali, sono (Dobesch et al., 2007):

- quota, pendenza, esposizione del terreno (rilevanti per quasi tutte le variabili meteo-climatiche);
- coordinate geografiche, in particolare la latitudine (rilevanti principalmente per temperatura e radiazione solare);
- distanza dal mare o da altri grandi corpi idrici (significativa per temperatura, nuvolosità, radiazione solare, precipitazione, intensità del vento);
- uso del suolo, ad esempio urbano o agricolo (significativo per temperature e intensità del vento);
- tipi di tempo dedotti da metodi di classificazione della circolazione sinottica (rilevanti per quasi tutte le variabili meteo-climatiche);
- osservazioni della variabile di interesse stessa o di altre variabili collegate, effettuate grazie a strumenti di misura diversi da quello principale (ad esempio misure di precipitazione da radar come supporto alla mappatura della precipitazione misurata da pluviometri; Sideris et al., 2014);
- serie temporali di osservazioni della variabile meteo-climatica di interesse incomplete rispetto al periodo di riferimento per l'analisi (Journée et al., 2015);
- risultati da modelli numerici e fisici che possono fornire campi di background o di "first guess" affidabili e fisicamente coerenti.

Queste informazioni possono essere integrate in maniera più o meno automatica nell'interpolazione spaziale, con modalità diverse a seconda della tecnica in uso. È necessario ricordare che la modellazione di eventuali trend e campi di background sulla base di queste informazioni aggiuntive può anch'essa risentire della distribuzione delle osservazioni. Ad esempio, considerare esplicitamente un gradiente verticale di temperatura o di precipitazione (tipicamente negativo per la temperatura e positivo per la precipitazione) può condurre a risultati inaccurati o errati se il range di quote del territorio di interesse non è adeguatamente rappresentato dalle quote delle stazioni. Il caso più tipico si riconduce

all'usuale scarsità di stazioni meteorologiche alle quote più elevate: qui infatti i metodi di interpolazione che si basano sulla considerazione di un trend legato all'altitudine lavorano in "estrapolazione" del termine di trend, con la possibilità di commettere errori anche importanti legati all'assenza di osservazioni alle quote maggiori (Dobesch et al., 2007). Da sottolineare il fatto che l'elevazione del terreno è un'eccellente variabile per la predizione statistica, perché campionata con un'altissima densità spaziale su griglie regolari. Sono infatti liberamente disponibili innumerevoli risorse di dati di elevazione del terreno del tipo Digital Elevation Model (DEM), caratterizzate da risoluzioni spaziali anche molto elevate (dell'ordine dei metri o frazioni).

In tutte le operazioni descritte nei paragrafi precedenti si sono rivelati molto preziosi in anni recenti i cosiddetti strumenti GIS (Geographical Information System), resisi oggi indispensabili per una gestione agile delle informazioni geografiche e spaziali in genere. Inoltre, i software GIS spesso includono moduli specifici dedicati all'interpolazione spaziale, al calcolo di parametri (ad esempio pendenza e esposizione del terreno) e metriche non convenzionali associate alla morfologia del terreno, all'individuazione di unità morfologiche, all'implementazione di modelli di radiazione solare o di modelli idrologici.

La quantificazione dell'accuratezza della tecnica di spazializzazione può essere effettuata mediante il confronto dei risultati dell'interpolazione applicata con i valori della variabile della interesse forniti da un dataset indipendente da quello analizzato, quando disponibile. Nella maggior parte dei casi quest'ultimo però non esiste o non è disponibile, pertanto si applicano tecniche di validazione incrociata ("cross-validation") che consistono nell'escludere una o più osservazioni a turno dall'applicazione del metodo di interpolazione, e nel confrontare stime e osservazioni per tale sottoinsieme di dati riservato alla validazione. Le statistiche di base calcolate per gli errori di stima così valutati rappresentano l'indicazione di accuratezza ricercata.

3 Mappatura della temperatura

3.1 La temperatura in terreno complesso

La temperatura dell'aria vicino alla superficie è un fattore chiave in molti processi naturali e quindi la sua accurata stima a scala locale è molto importante. Possibili applicazioni spaziano dalla modellazione del ciclo idrologico per fini di sicurezza, al controllo dell'umidità del suolo, alla modellazione degli ecosistemi, alla valutazione delle potenzialità diverse tipologie di colture, all'analisi della copertura nevosa e dei bilanci di massa dei ghiacciai, alla ricerca in campo climatico. Quest'ultima include il monitoraggio delle variazioni e delle tendenze, la valutazione dei modelli climatici regionali e dei modelli di previsione meteorologica, la costruzione di scenari di cambiamento climatico.

In generale, in un'area fortemente montuosa, come è la regione del Trentino, la distribuzione spaziale della temperatura al suolo mostra uno stretto legame con la quota del terreno: è infatti presente un caratteristico gradiente verticale negativo delle temperature medie in ogni stagione dell'anno (pari a circa $-6.5 \text{ }^\circ\text{C km}^{-1}$), pressoché lineare e più pronunciato in estate che in inverno (vedi Fig. 5).

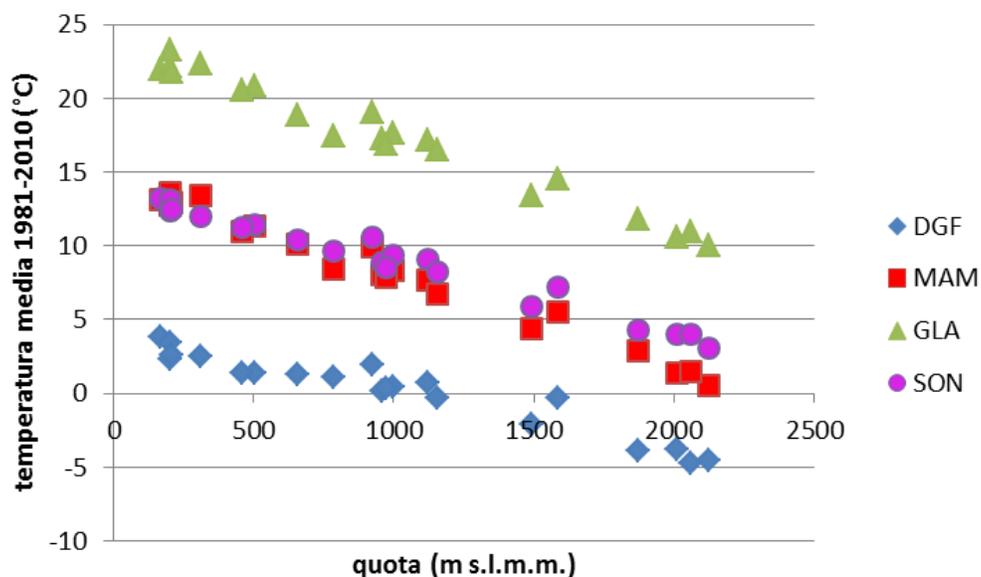


Figura 5. Distribuzione con la quota del terreno delle osservazioni di temperatura giornaliera media stagionale per il trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico. DGF indica l'inverno meteorologico (mesi di dicembre, gennaio e febbraio), MAM la primavera (marzo, aprile, maggio), GLA l'estate (giugno, luglio agosto) e SON l'autunno (settembre, ottobre, novembre).

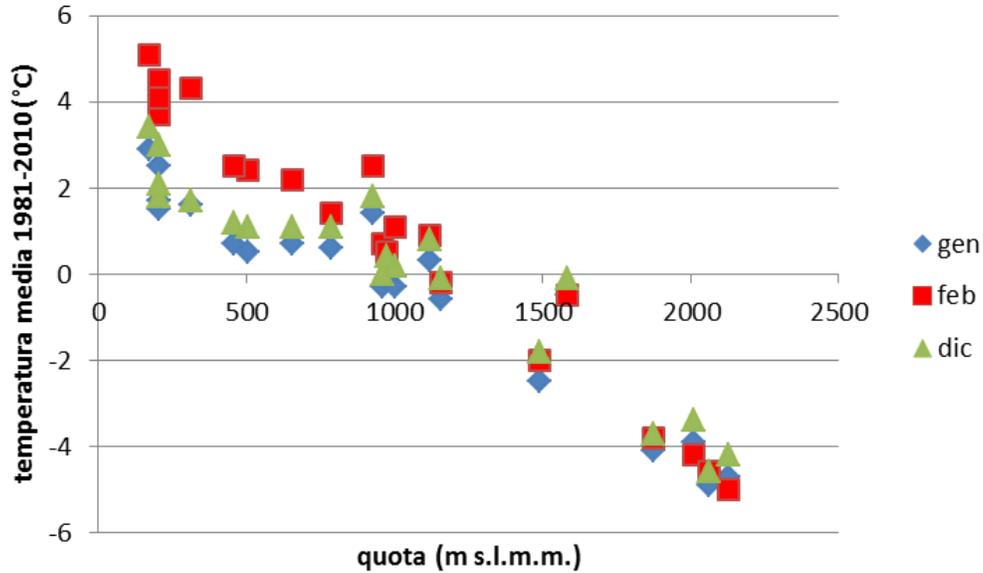


Figura 6. Distribuzione con la quota del terreno delle osservazioni di temperatura giornaliera media mensile per l'inverno (gennaio, febbraio, dicembre) del trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico.

Nei mesi invernali inoltre si identificano agevolmente due diversi comportamenti del gradiente altitudinale, uno per le quote sopra i ~1000-1200 m s.l.m. e uno per le quote inferiori (Fig. 6), un comportamento che appare strettamente connesso al ricorrente verificarsi di inversioni termiche nelle profonde valli che caratterizzano il territorio oggetto di studio, con effetti marcati soprattutto in quelle con orientamento est-ovest. Questo fenomeno fa sì che i volumi d'aria contenuti nelle valli siano addirittura mediamente più freddi dell'aria sovrastante, pertanto i risultanti gradienti verticali medi risultano minori di quelli degli strati superiori (vedi in particolare gennaio e dicembre in Fig. 6). Questo stretto legame fisico con la quota del terreno costituisce sicuramente un aspetto fondamentale da sfruttare adeguatamente nella mappatura della variabile temperatura sul territorio alpino del Trentino. Da notare il fatto che non esistono osservazioni utili oltre la quota di 2125 m s.l.m., pertanto oltre quelle quote i metodi di mappatura lavoreranno ragionevolmente in estrapolazione (come d'altro canto nelle aree periferiche del dominio, esterne all'involuppo delle posizioni delle stazioni osservative).

3.2 Dati di temperatura disponibili

I dati di temperatura disponibili per l'Atlante Climatico del Trentino sono stati elaborati grazie alle analisi statistiche di serie storiche giornaliere

condotte dalla Fondazione E. Mach nei progetti CLITRE50 e CLITRE100. I valori di temperatura sono disponibili solo per 22 stazioni di misura (Fig. 7) gestite dalla Fondazione stessa e da Meteotrentino, e sono stati mediati sui trentenni di riferimento 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010 (trentennio per il quale abbiamo solo 21 stazioni) su base mensile, stagionale e annuale. In particolare disponiamo delle seguenti variabili:

- temperatura media giornaliera (°C)
- media della temperatura massima giornaliera (°C)
- media della temperatura minima giornaliera (°C)
- massima delle temperature massime giornaliere (°C)
- minima delle temperature minime giornaliere (°C)
- giorni di gelo nei quali $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ (giorni)
- giorni senza disgelo nei quali $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$ (giorni)
- giorni estivi nei quali $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ (giorni)
- escursione termica media giornaliera (°C).

Per il presente progetto si è ritenuto di fornire le mappe della distribuzione continua per il territorio trentino solo per la prima delle variabili, ovvero la temperatura media giornaliera in °C.

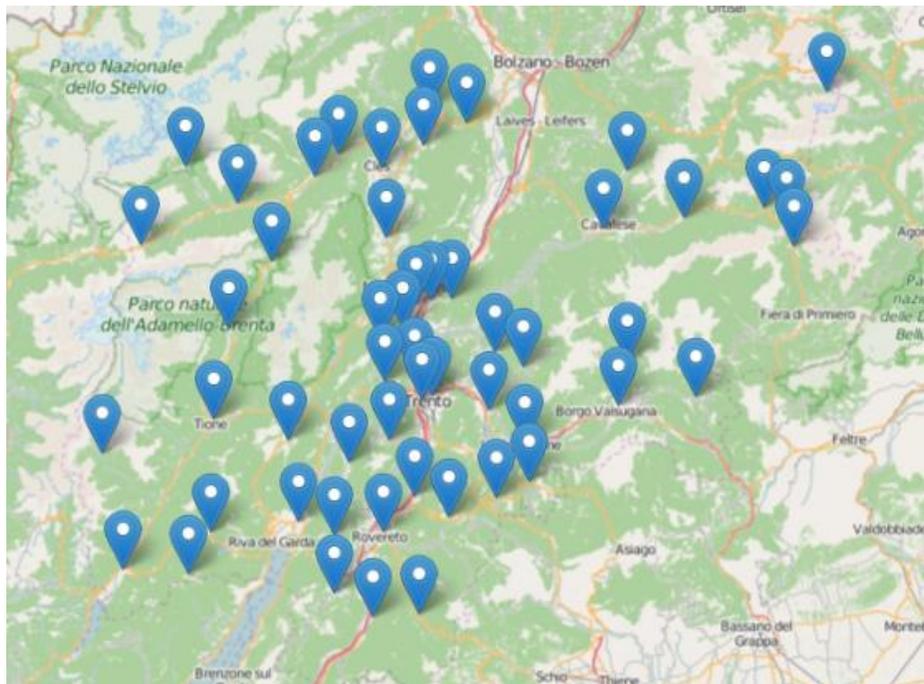


Figura 7. Distribuzione delle stazioni di misura considerate per l'Atlante Climatico del Trentino (sono comprese tutte le stazioni, non solo quelle che misurano la temperatura).

Infatti le altre variabili, a parte l'escursione termica media giornaliera, sono volte ad identificare gli estremi climatici termici per la regione di interesse, in maniera più o meno marcata. Questo rende più complicata la loro mappatura, in quanto tale circostanza spesso sottende a distribuzioni non normali dei valori stessi, o a valori non continui o limitati superiormente/inferiormente.

3.3 Metodi di mappatura della temperatura

Molteplici metodi di mappatura della temperatura vicino al suolo sono stati proposti negli anni. Di seguito riportiamo alcuni degli approcci più interessanti o più recenti, adeguatamente selezionati in base alle caratteristiche orografiche e climatiche del dominio di analisi.

Circa vent'anni fa, Hudson e Wackernagel (1994) applicarono un kriging con drift esterno (KED) alle temperature medie di gennaio in Scozia, identificando per primi l'elevazione del terreno quale variabile ausiliaria ottimale in tale operazione. Più recentemente, Brunetti et al. (2014) hanno posto a confronto tre approcci di mappatura ad alta risoluzione di climatologie mensili di temperature per l'Italia: una regressione multi-lineare con aggiustamenti locali (elaborata in primis per essere applicata nella Grande Regione Alpina; Hiebl et al. 2009, 2011), un kriging residuale e una regressione lineare pesata locale tra temperatura e quota del terreno. Quest'ultimo approccio è basato sul metodo PRISM (Parameter-elevation Regression on Independent Slopes Model; www.prism.oregonstate.edu; Daly et al. 1994, 2002, 2008; Daly, 2006), a sua volta un'evoluzione dell'approccio di regressione pesata geograficamente, ovvero in base alle caratteristiche fisiografiche della superficie terrestre. Lo studio ha evidenziato che gli errori minori sono forniti appunto dal terzo metodo, in virtù della migliore riproduzione della relazione locale tra temperatura e quota per un territorio orograficamente complesso come quello italiano. In generale, il kriging residuale ha comunque mostrato differenze non rilevanti rispetto al risultato fornito dalla regressione lineare locale. Rispetto a quest'ultimo approccio inoltre, il kriging residuale presenta come punto di forza la sua semplicità e l'utilizzo di procedure ragionevolmente standardizzate. Inoltre è applicabile anche in caso di densità non elevata della rete osservativa, non sufficiente quindi per la stima di un gradiente termico altitudinale locale.

Nell'ambito del progetto Interreg IV 3PCLIM (www.3pclim.eu) sono state elaborate mappe giornaliere di temperatura (e copertura nevosa) con una

risoluzione spaziale pari a 500 m, grazie ad un nuovo metodo deterministico proposto e descritto da Frei (2014) e Hiebl e Frei (2015), che si regge sul concetto della separazione delle scale. Il metodo separa la determinazione del campo macro-climatico di background, che rappresenta la più ampia scala planimetrica e le variazioni verticali a scala di bacino e che varia in maniera “liscia”, dal campo di anomalia a scala meso-climatica, che riproduce fenomeni più locali, a scala di valle alpina, come “cold pools” oppure strati d’aria calda legati a eventi di foehn. Il campo termico di background è costituito da funzioni parametriche non-lineari della quota determinate per predefinite regioni del dominio di studio, che si sovrappongono gradualmente. Il campo di anomalia invece è costruito grazie ad una combinazione lineare pesata dei residui valutati presso le stazioni, utilizzando uno schema di IDW basato su una metrica non euclidea che considera le ostruzioni topografiche al flusso d’aria. Sulla base della comparazione dei metodi riportati e della disponibilità effettiva di osservazioni, è evidente l’assoluta necessità di includere l’informazione altimetrica (quota del terreno) nella procedura di mappatura della temperatura sul territorio del Trentino. Tuttavia la scarsità di osservazioni (solo 21-22 stazioni sul territorio) impedisce a priori l’applicazione di un approccio strettamente locale di regressione e la suddivisione in più sotto-aree del dominio nella determinazione del profilo verticale di background.

3.4 Il metodo adottato per l’Atlante

Il metodo di mappatura utilizzato nell’Atlante Climatico del Trentino per la rappresentazione delle distribuzioni di temperatura relative ai tre trentenni di riferimento e alle diverse basi temporali considerate (mese, stagione, anno) è la tecnica detta Optimal Interpolation (Uboldi et al., 2008). Si tratta di una tecnica di analisi oggettiva applicabile a una rete di osservazioni meteorologica ad alta risoluzione in presenza di orografia complessa. I valori di “analisi” presso i punti della griglia di interpolazione sono ottenuti sommando ad adeguati valori di “background” (o “first guess”) delle quantità incrementali, stimate per mezzo di una relazione lineare basata sulle “innovazioni” (ovvero sulle differenze tra i valori osservati e i valori del campo di background valutato presso le stazioni osservative). Nello specifico, in assenza di un campo di temperatura di background da modello si utilizza una procedura semplice ed efficace di de-trending delle osservazioni stesse,

stimando con un metodo ai minimi quadrati una funzione lineare nelle tre coordinate spaziali, che ammette gradienti verticali costanti a tratti (Fig. 8). Questo è particolarmente rilevante nel caso già citato di pronunciate inversioni termiche al suolo. È poi imposto un vincolo di minimizzazione della varianza dell'errore delle "analisi". Funzioni di correlazione nelle tre dimensioni sono inoltre utilizzate per tenere adeguatamente conto della distribuzione orografica delle stazioni.

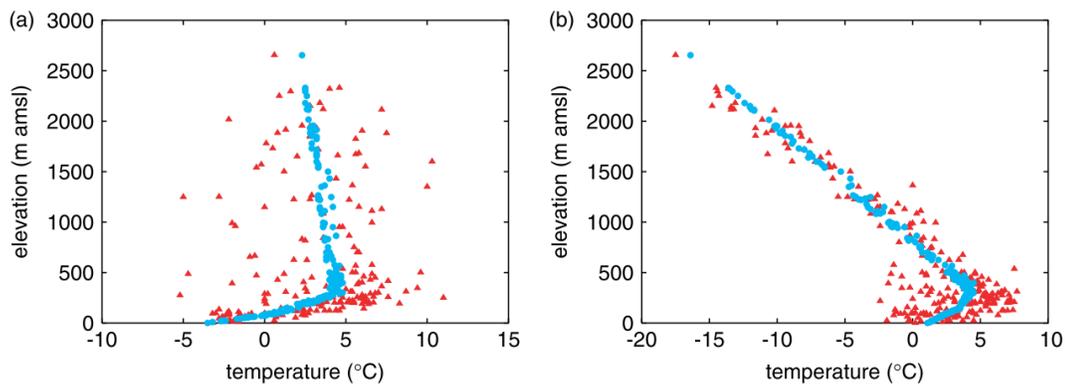


Figura 8. Figura tratta da Uboldi et al. (2008) che mostra le osservazioni di temperatura (in rosso) e il campo di background (in azzurro), ottenuto tramite de-trending delle osservazioni stesse. Sono riportati due casi esemplificativi per la regione Lombardia: (a) caso di nebbia persistente, 20 gennaio 2006, ore 12:00; (b) caso di foehn da nord e neve in quota: 12 marzo 2006, ore 05:00.

I parametri di correlazione alla minima scala sono stimati grazie al campo di Integral Data Influence (IDI). Con questo metodo, del quale è ben conosciuta l'equivalenza formale con i metodi di tipo kriging e "smoothing splines" (Daly, 1991), il Servizio Meteorologico Regionale della Lombardia elabora routinariamente analisi orarie di temperatura e umidità relativa, e lo stesso fa Meteotrentino per la sola temperatura. Le mappe orarie e giornaliere ottenute con la tecnica Optimal Interpolation mostrano informazioni significative e affidabili anche in presenza di pronunciate gradienti spaziali e situazioni meteorologiche particolari. Questo metodo costituisce potenzialmente un'ottima base per l'implementazione di uno schema multivariato di assimilazione dati di tipo "ibrido", includendo non solo tutte le osservazioni meteo-climatologiche, ma anche le informazioni da modello dinamico. Per ulteriori informazioni sul metodo e la sua accuratezza di veda Uboldi et al. (2008).

Di seguito sono offerti due esempi di mappe di temperatura media mensile offerte sul sito web dell'Atlante Climatico Trentino (Fig. 9 e 10).

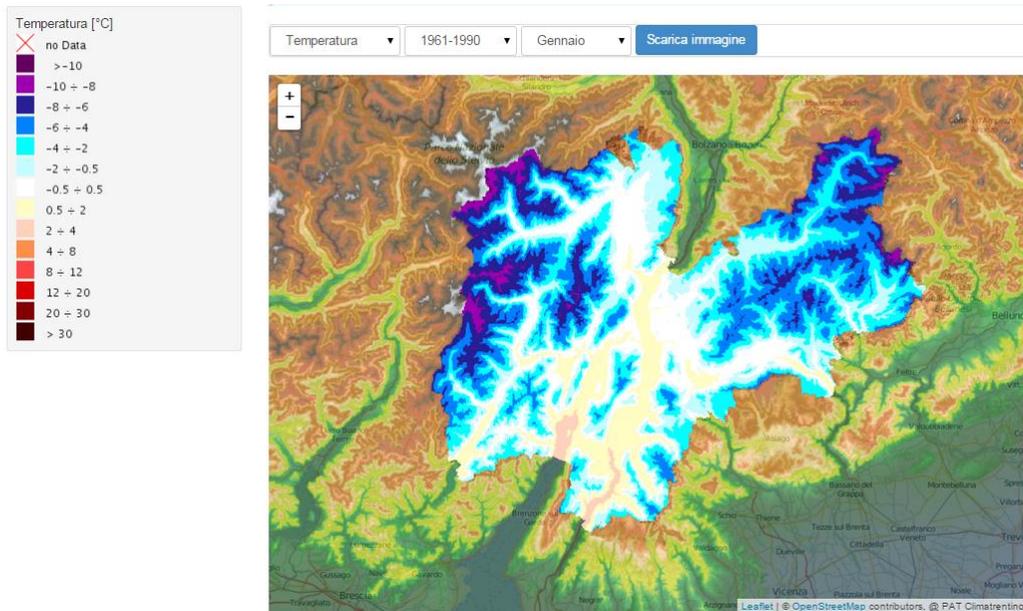


Figura 9. Mappa di temperatura media giornaliera (°C) per il mese di gennaio per il trentennio di riferimento 1961-1990, così come presentata sul sito web dell'Atlante Climatico del Trentino.

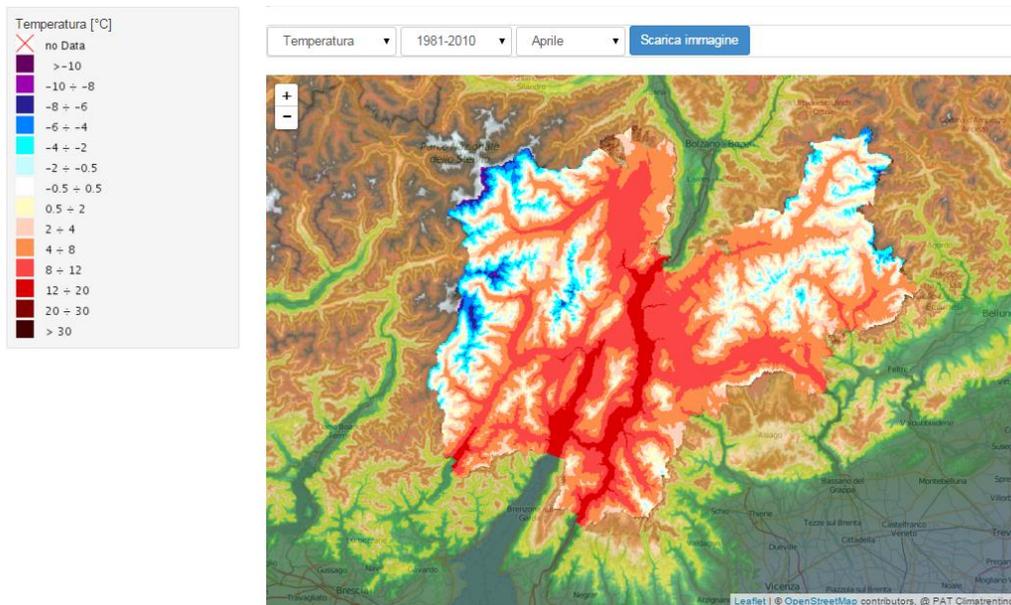


Figura 10. Mappa di temperatura media giornaliera (°C) per il mese di aprile per il trentennio di riferimento 1981-2010, così come presentata sul sito web dell'Atlante Climatico del Trentino.

Si è scelto di mantenere la tecnica di Optimal Interpolation come metodo di mappatura prescelto, avendo valutato i buoni riscontri del metodo in letteratura scientifica, l'equivalenza sostanziale del metodo con i metodi di tipo kriging (i soli, a nostro avviso e secondo la letteratura specialistica, alternativamente in grado di fornire risultati ragionevoli), l'impossibilità di applicare sofisticati metodi di regressione multivariata a causa dell'oggettiva scarsità di osservazioni a disposizione, l'utilizzo consolidato del metodo per la variabile temperatura da parte dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente (ARPA) della Regione Lombardia e di Meteotrentino. La modellazione dettagliata del campo di background di temperatura è in ogni caso da tenere come possibilità di sviluppo ulteriore dell'approccio utilizzato, nel momento in cui saranno un domani disponibili osservazioni da più stazioni, in numero tale da consentire una stima robusta del trend di temperatura. Allo stato attuale però ciò non appare fattibile o ragionevole.

3.5 Altre azioni

Oltre alle attività sopra descritte, si sono realizzate delle mappe del numero di giorni estivi, ovvero di numero di giorni nei quali la temperatura massima giornaliera supera i 25°C, per i tre trentenni di riferimento considerati. Questa attività è stata svolta in prima battuta come attività di supporto al progetto di Ateneo CLIMAWARE (vedi abouthydrology.blogspot.it/2014/09/project-climaware.html), al quale il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, e in particolare il Gruppo di Fisica dell'Atmosfera, partecipano. Uno dei gruppi di ricerca partecipanti al progetto ha espresso la necessità di effettuare un'analisi di tipo cluster sui Comuni della Provincia di Trento allo scopo di individuare dei gruppi di comuni climaticamente assimilabili tra loro. Pertanto si sono fornite, assieme alle mappe di temperatura e precipitazione medie mensili, stagionali e annue, anche delle mappe di numero medio di giorni estivi con la temperatura massima oltre i 25°C per la stagione estiva. Tali mappe sono state ottenute testando e individuando un adeguato trend con la quota, grazie ad una regressione ai minimi quadrati, e mappando poi i residui associati a questa regressione con un'interpolazione di tipo IDW. Nello specifico il trend con la quota è stato definito per mezzo di una funzione polinomiale di secondo grado rispetto alla quota z del terreno, come segue:

$$\text{No. giorni } T_{\max} > 25^{\circ}\text{C} = a \cdot z^2 + b \cdot z + c \quad (z < z_{\text{rif}})$$

fino ad una quota massima di riferimento oltre la quale la variabile in esame assume un valore nullo:

$$\text{No. giorni } T_{\max} > 25^{\circ}\text{C} = 0 \quad (z \geq z_{\text{rif}}).$$

È stata inoltre imposta la continuità del trend nel punto di raccordo, ovvero alla quota di riferimento. Le mappe realizzate hanno permesso la valutazione del cambiamento di questa variabile dal 1961-1990 al 1981-2010 (vedi Fig. 11), e sono state utilizzate nella successiva analisi cluster.

Tale attività è stata intrapresa e portata a termine nell'ottica di favorire la diffusione dei risultati dell'Atlante Climatico, e di promuovere il loro utilizzo a scopi di ricerca nel campo del cambiamento climatico a scala regionale in area alpina e delle sue implicazioni sul ciclo idrologico, sulla disponibilità di risorsa idrica e sul rischio idrogeologico.

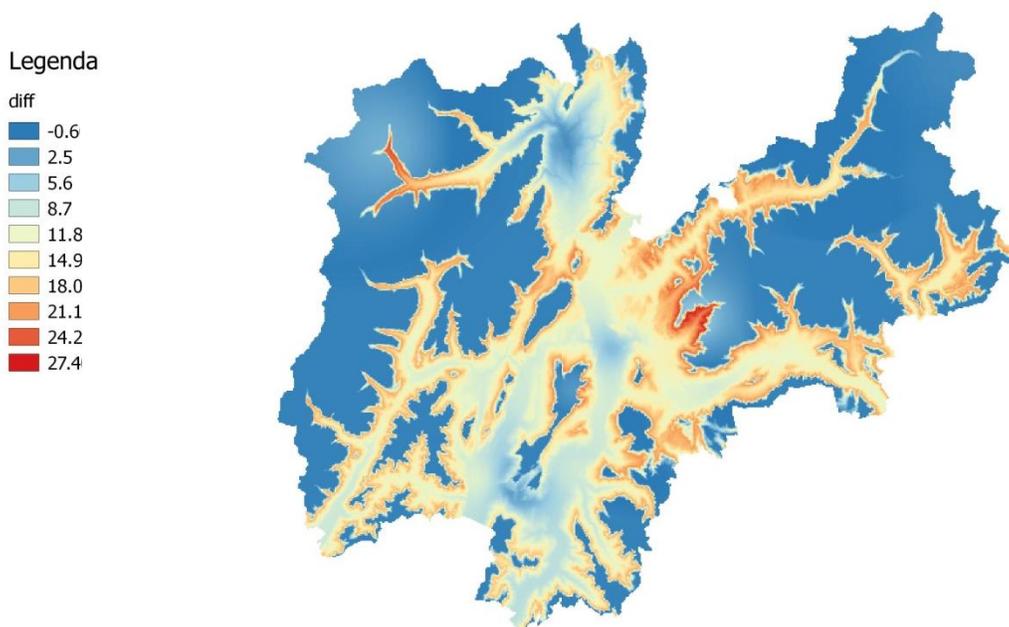


Figura 11. Differenza tra il numero di giorni estivi con $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ relativi al trentennio 1981-2010 e quelli del trentennio di riferimento 1961-1990 (in giorni). È evidente il fronte di maggior intensità del cambiamento della variabile considerata, legato al riscaldamento climatico in atto. Tale zona si attesta comprensibilmente intorno alla quota di 1500 m s.l.m., dove il numero di giorni estivi con $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ tipicamente si annulla. L'incremento è molto meno marcato alle quote inferiori.

Immagine gentilmente fornita dal Dr. Rocco Scolozzi.

4 Mappatura della precipitazione

4.1 La precipitazione in terreno complesso

La precipitazione rappresenta una variabile meteo-climatologica di primaria importanza, la cui mappatura trova applicazione pratica in campo agro-meteorologico, idrologico, nella gestione delle risorse idriche, nella modellazione degli ecosistemi, del rischio idro-geologico, del rischio di incendio, del rischio di infestazione da parte di parassiti, nella stima dell'umidità dei suoli, e molto altro ancora. La precipitazione è una delle variabili chiave anche nella ricerca in campo climatico, dove molti sforzi sono stati fatti e vengono attualmente fatti per stimare e prevedere i cambiamenti e i trend di tale aspetto meteo-climatologico.

Come la temperatura, anche la precipitazione è fortemente influenzata dalla morfologia e dalla topografia del territorio di interesse. Rispetto alla temperatura, la precipitazione ha una natura molto più variabile e discontinua nello spazio e nel tempo: quanto più breve è la scala di analisi, tanto più questa variabilità è accentuata, in maniera particolare in contesti montuosi come il territorio della Provincia di Trento. In particolare la precipitazione mostra spesso un legame abbastanza evidente con l'elevazione del terreno (vedi Fig. 12), presentando quantità cumulate crescenti per quote crescenti. Tale aspetto è più pronunciato nella stagione estiva (con un gradiente verticale di 65 mm km^{-1} su una media stagionale di 300 mm , traducibile in circa $+20\% \text{ km}^{-1}$; coefficiente di correlazione $R^2 = 0.55$), quando dominano eventi di precipitazione a carattere convettivo, che nelle altre stagioni, quando la precipitazione è principalmente a carattere stratiforme. Infatti, in inverno, primavera e autunno le distribuzioni della precipitazione stagionale media con la quota del terreno sono molto più incerte che in estate e mostrano gradienti altitudinali minori, addirittura nulli nel caso della stagione invernale, per la quale la correlazione tra quota e precipitazione è nulla. In generale la correlazione con la quota è molto minore della correlazione mostrata dalle osservazioni di temperatura media giornaliera (vedi sezione 3.1).

La minore correlazione con la quota dipende probabilmente dal fatto che la precipitazione risente anche dei fenomeni di ombra pluviometrica ("rain shadow"), che si manifestano sui versanti di montagne e catene montuose sottovento rispetto ai venti prevalenti. Gli ostacoli geografici

ostruiscono il passaggio delle masse d'aria cariche di umidità, favorendo la precipitazione sui versanti sopravvento e sulle cime dei monti. Le correnti orizzontali sono costrette infatti a risalire i versanti sopravvento, inducendo un sollevamento orografico che ha l'effetto di indurre l'aria ad espandersi e raffreddarsi fino al verificarsi della precipitazione, con conseguente diminuzione del contenuto di umidità. L'aria poi ridiscende lungo il versante opposto, scaldandosi nuovamente (meccanismo dei venti di foehn) e generando una situazione relativamente più arida nella regione sottovento. Nel caso del Trentino i venti prevalenti soffiano dai quadranti meridionali, pertanto è lecito aspettarsi una diminuzione media della precipitazione cumulata man mano che ci si sposta verso nord, ovvero risalendo il versante meridionale della catena Alpina, il cui spartiacque si trova al confine tra la Provincia Autonoma di Bolzano e l'Austria. In effetti la correlazione con la latitudine (Fig. 13) evidenzia un trend negativo da sud verso nord, che spiega anche l'elevata dispersione della distribuzione rispetto alla quota del terreno. L'effetto della longitudine è meno evidente (Fig. 14), ma nella stagione invernale, quando anche il trend latitudinale appare più definito e regolare, appare chiara una tendenza alla diminuzione della precipitazione cumulata muovendosi da ovest verso est.

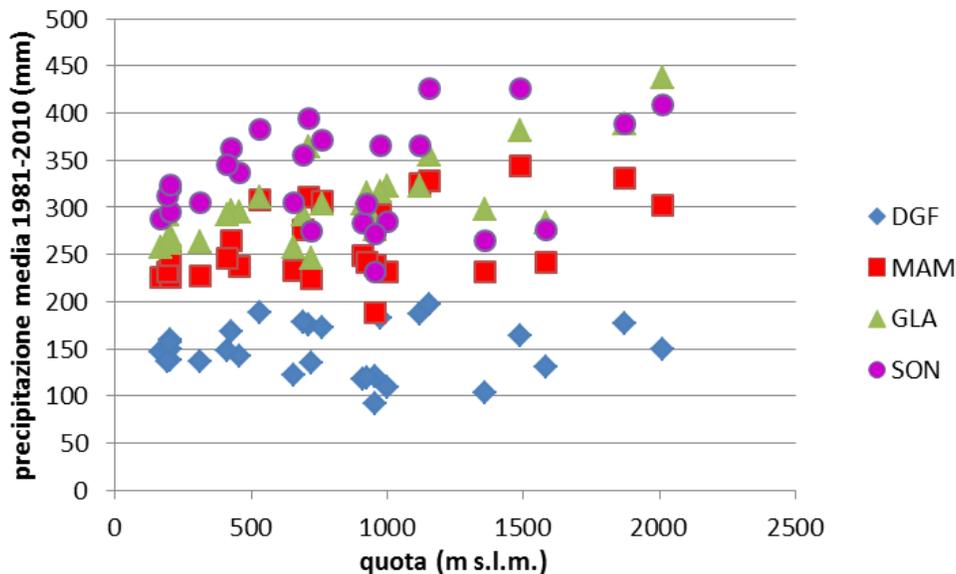


Figura 12. Distribuzione con la quota del terreno delle osservazioni di precipitazione cumulata media stagionale per il trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico. DGF indica l'inverno, MAM la primavera, GLA l'estate e SON l'autunno (stagioni meteorologiche).

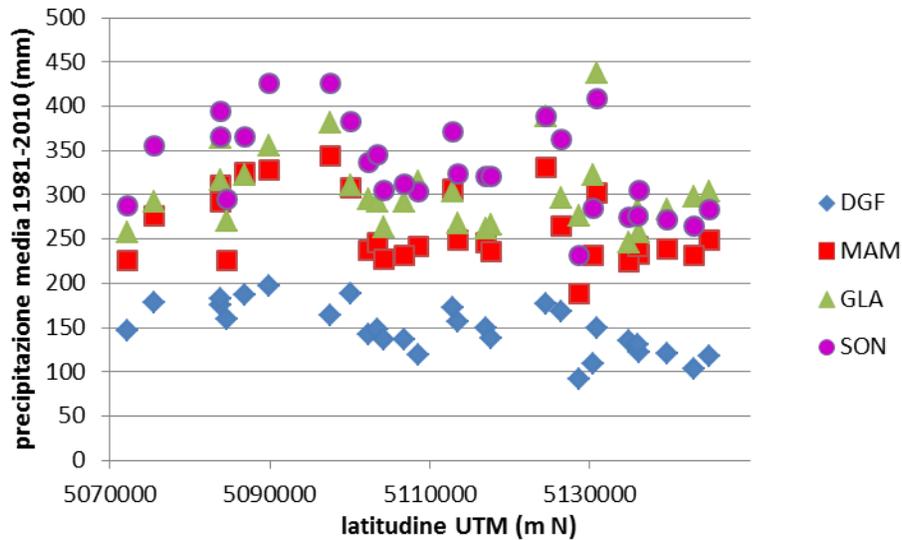


Figura 13. Distribuzione con la latitudine delle osservazioni di precipitazione cumulata media stagionale per il trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico (vedi Fig. 12; stagioni meteorologiche).

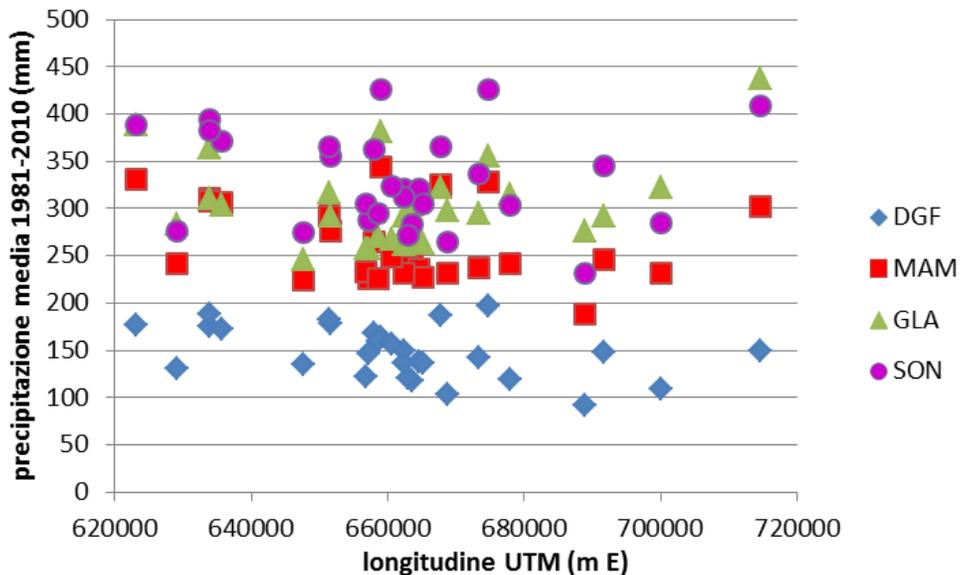


Figura 14. Distribuzione con la longitudine delle osservazioni di precipitazione cumulata media stagionale per il trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico (vedi Fig. 12; stagioni meteorologiche).

Questo appare indirettamente collegato con quanto osservato da Panziera et al. (2014, 2015) nell'analisi delle situazioni sinottiche per il Trentino, ovvero il fatto che le configurazioni con vento da sud-ovest portano i maggiori apporti di pioggia. Purtroppo la scarsità di stazioni non ci permette di apprezzare sistematicamente l'effetto di ombra pluviometrica

su scale più piccole e in maniera più dettagliata (ad esempio per singoli massicci montuosi) oppure la differenza tra ciò che succede nei fondovalle e ciò che succede in quota. In ogni caso la presenza di queste correlazioni con la posizione geografica rispetto alla catena alpina e la quota delle stazioni costituiscono un punto di partenza per l'individuazione di un metodo di mappatura adeguato al problema in esame. Si noti che purtroppo non ci sono osservazioni utili oltre la quota di 2012 m s.l.m. e che tutte le stazioni considerate ricadono all'interno del territorio della Provincia di Trento.

4.2 Dati di precipitazione disponibili

I dati di precipitazione disponibili per l'Atlante Climatico del Trentino sono stati elaborati grazie alle analisi statistiche di serie storiche giornaliere portate avanti dalla Fondazione E. Mach nei progetti CLITRE50 e CLITRE100. I valori di precipitazione sono disponibili solo per 33 stazioni di misura (Fig. 7) gestite dalla Fondazione stessa e da Meteotrentino, e sono stati mediati sui trentenni di riferimento 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010 (trentennio per il quale abbiamo solo 29 stazioni) su base mensile, stagionale e annuale. In particolare disponiamo delle seguenti variabili:

- precipitazione cumulata (mm)
- giorni di pioggia, ovvero giorni nei quali la precipitazione > 1 mm (giorni)
- media della massima precipitazione giornaliera (mm)
- media della massima precipitazione in 5 giorni consecutivi (mm).

Solo per la prima delle variabili, ovvero la precipitazione cumulata in mm, si è deciso di fornire le mappe della distribuzione continua per il territorio Trentino. Le altre variabili, a parte il numero di giorni di pioggia, sono volte ad identificare gli estremi climatici termici per la regione di interesse, in maniera più o meno marcata. Oltretutto, questo rende più complicata la loro mappatura, in quanto tale circostanza spesso conduce a distribuzioni non normali dei valori stessi, oppure a valori discontinui o limitati superiormente/ inferiormente.

4.3 Metodi di mappatura della precipitazione

Di seguito riportiamo alcuni degli esempi di interpolazione della precipitazione più interessanti o più recenti, adeguatamente selezionati in base alle caratteristiche orografiche e climatiche del dominio di analisi.

In letteratura sono disponibili moltissimi studi che confrontano diversi metodi di mappatura applicati alla precipitazione. I risultati e i metodi indentificato come ottimali dipendono soprattutto dalla scala temporale di interesse (annuale, mensile, giornaliera, oraria) e dalla morfologia del territorio di interesse. Già Tabios e Salas (1985) identificarono le tecniche geostatistiche (kriging ordinario e universale) come superiori ai metodi dei poligoni di Thiessen, alla regressione rispetto a trend polinomiali e ai metodi basati su IDW per la mappatura della precipitazione media annua. In seguito confronti tra diversi metodi geostatistici sono stati effettuati con frequenza crescente, man mano che i metodi di tipo kriging si sono diffusi come pratica consolidata. Ad esempio Philips et al. (1992) hanno confrontato l'accuratezza delle stime di precipitazione per "ordinary kriging", "residual" o "detrended kriging" e "co-kriging" per una regione montuosa, identificando "detrended kriging" e "co-kriging" come i metodi migliori in assoluto, vista la significativa riduzione dell'errore di stima che essi comportano rispetto al kriging ordinario. In generale infatti i metodi di tipo kriging che sfruttano le caratteristiche topografiche del territorio di interesse forniscono le performance migliori. Un'altra considerazione generale è la tipica uniformità dei risultati ottenuti con kriging ordinario e residuale rispetto alla frammentarietà dei campi interpolati grazie al co-kriging. Pardo-Igúsquiza (1998) ha invece individuato il "kriging con drift esterno" come metodo migliore per la mappatura della precipitazione nella Spagna meridionale, con performance che superano quelle di kriging ordinario e co-kriging. Daly et al. (1994, 2002) hanno testato il metodo PRISM e tecniche geostatistiche per un bacino montuoso in Oregon, selezionando PRISM e kriging residuale come metodi di interpolazione ottimali. PRISM è stato scelto anche da Efthymiadis et al. (2006), che ne hanno utilizzato una versione modificata e calibrata per l'interpolazione delle medie mensili di precipitazione per la Grande Regione Alpina su griglia regolare con risoluzione 10'. Per scale temporali brevi, come quella giornaliera, e per eventi estremi di precipitazione (massimo annuale di precipitazione cumulata giornaliera), ovvero per variabili con distribuzioni molto diverse da quella normale o gaussiana, Prudhomme e Reed (1998) hanno dimostrato che il kriging residuale produce risultati più realistici dell'ordinary kriging per le aree montuose della Scozia. Recentemente le mappe di precipitazione elaborate nell'ambito del progetto Interreg IV

3PCLIM (www.3pclim.eu) sono state costruite grazie al metodo PRISM, ovvero con un metodo di regressione pesata geograficamente (Daly et al. 1994, 2008), a partire dal database pubblicato da Frei e Schär (1998). Il metodo (vedi Sezione 2.3.3) considera esplicitamente la pronunciata dipendenza della variabile dall'elevazione del terreno. In particolare, in questo caso si è rivelata importante la localizzazione a nord o a sud della cresta alpina principale. Di Piazza et al. (2011) hanno valutato diversi algoritmi di interpolazione spaziale, cioè IDW, regressione lineare semplice, regressione multipla, reti neurali artificiali, così come metodi geostatistici, come kriging ordinario e residuale per la mappatura di osservazioni annuali e mensili di precipitazione sul territorio della Sicilia. Lo studio ha rivelato che i metodi che non considerano l'informazione ausiliaria rappresentata dalla quota del terreno e dalle coordinate geografiche sono caratterizzati dagli errori più elevati, e che gli errori diminuiscono sistematicamente quando tali informazioni sono incluse nella mappatura.

Pertanto, sulla base dei metodi applicati in letteratura e qui riportati, nonché della disponibilità effettiva di osservazioni, è evidente l'assoluta necessità di includere l'informazione altimetrica (quota del terreno) nella procedura di mappatura della temperatura sul territorio del Trentino. La scarsità di osservazioni (solo 29 o 33 stazioni sul territorio) però impedisce a priori l'applicazione di un approccio strettamente locale e/o la suddivisione in più sotto-aree del dominio nella determinazione del profilo verticale di background.

4.4 Mappe di precipitazione dei servizi meteorologici italiani

Questo paragrafo presenta alcuni degli approcci seguiti oggi in Italia per la realizzazione e la pubblicazione di mappe di precipitazione a scala regionale o provinciale. La carrellata proposta di seguito intende rappresentare lo stato dell'arte nel momento presente a livello nazionale. Lo scopo è quello di contestualizzare nel panorama nazionale l'attività di investigazione e mappatura svolta per le mappe climatiche trentine.

Meteotrentino, il servizio meteorologico provinciale locale, attualmente pubblica routinariamente in tempo reale mappe di precipitazione oraria e giornaliera ottenute tramite l'applicazione di un ordinary kriging a partire da un set di circa 100-110 stazioni pluviometriche (Fig. 15). Mappe giornaliere, molto simili qualitativamente a quelle di Meteotrentino, sono prodotte dall'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano

sulla base di osservazioni raccolte da circa 50 stazioni (delle quali 8 esterne al territorio provinciale), ma non pubblicate in tempo reale (Fig. 16).

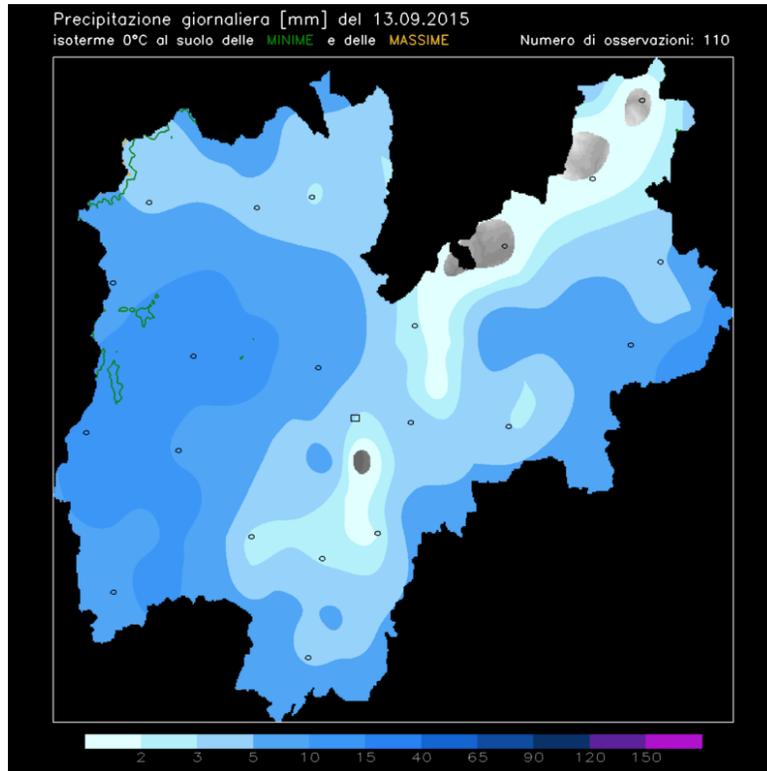


Figura 15. Mappa di precipitazione giornaliera sulla Provincia di Trento del 13 settembre 2015, pubblicata sul sito web di Meteotrentino.

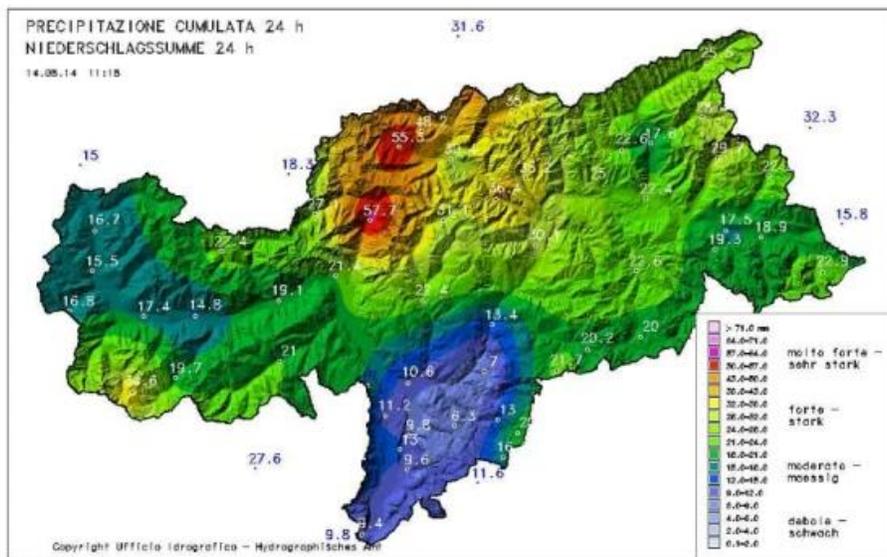


Figura 16. Mappa di precipitazione giornaliera sulla Provincia di Bolzano del 14 maggio 2014.

Un algoritmo di ordinary kriging è utilizzato anche dall’Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente (ARPA) della Regione Veneto, ad esempio per realizzare mappe di precipitazione cumulata (media) annuale, a partire dai dati di circa 160 pluviometri (Fig. 17). Per la Regione Friuli Venezia-Giulia (Osservatorio Meteorologico Regionale, OSMER) sono disponibili mappe di precipitazione media annuale e mensile, di numero di giorni di pioggia, di intensità di pioggia, etc. nell’Atlante climatico del Friuli Venezia-Giulia. Le mappe di precipitazione cumulata in particolare sono state realizzate con un algoritmo del tipo “natural neighbour” (vedi Sezione 2.1.1) sulla scorta di 77 stazioni pluviometriche regionali e 30 extra-regionali (Fig. 18). L’ARPA Lombardia ha invece prodotto mappe di precipitazione media mensile con un algoritmo di regressione lineare pesata applicato su circa 390 stazioni (Fig. 19; Brunetti et al., 2014).

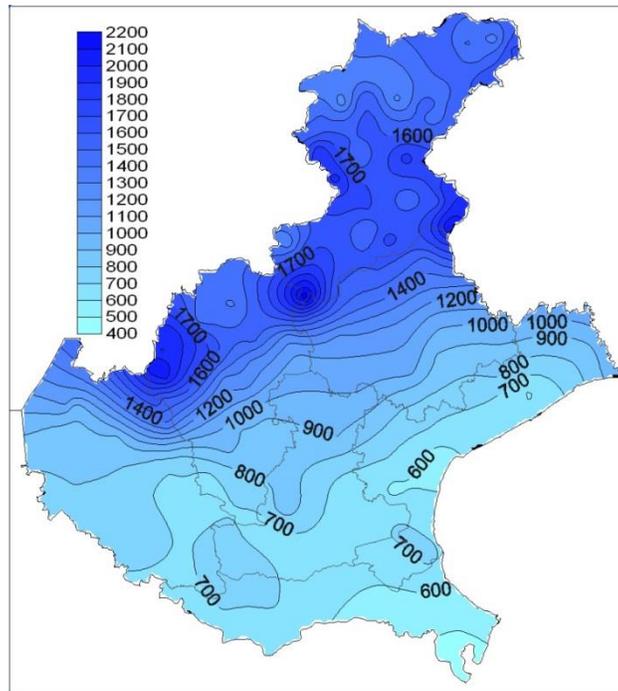


Figura 17. Mappa di precipitazione cumulata per l’anno 2012 sul territorio della Regione Veneto (fonte: www.arpa.veneto.it).

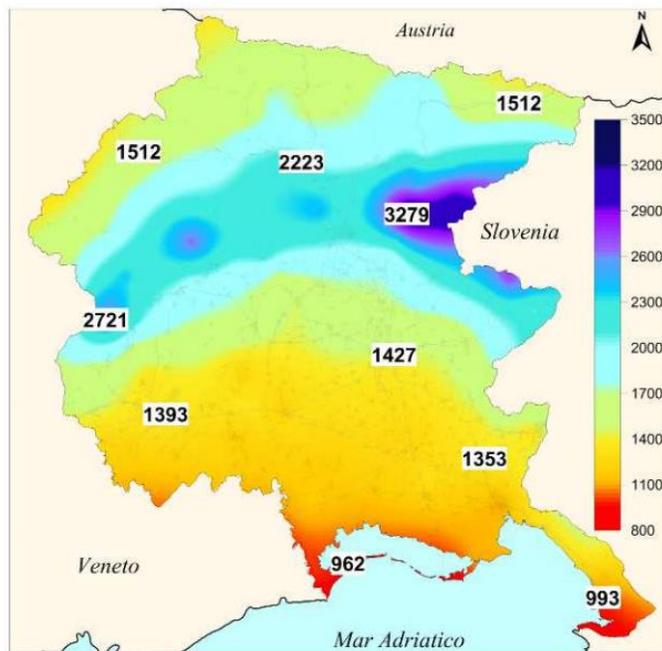


Figura 18. Mappa delle precipitazioni medie annue per il periodo 1961-2013 per il territorio della Regione Friuli Venezia-Giulia (www.meteo.fvg.it/clima.php?ln=&m=0).

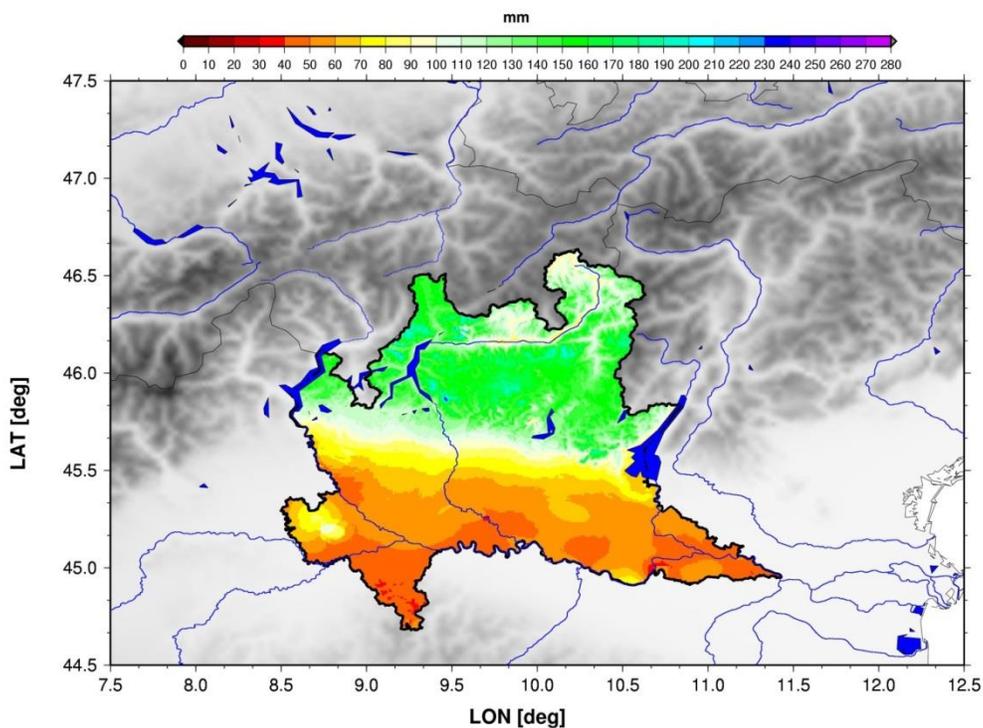


Figura 19. Mappa delle precipitazioni medie mensili di luglio per il trentennio 1961-1990 per il territorio della Regione Lombardia (ita.arpalombardia.it/ita/meteo/foralps_climatologia.asp).

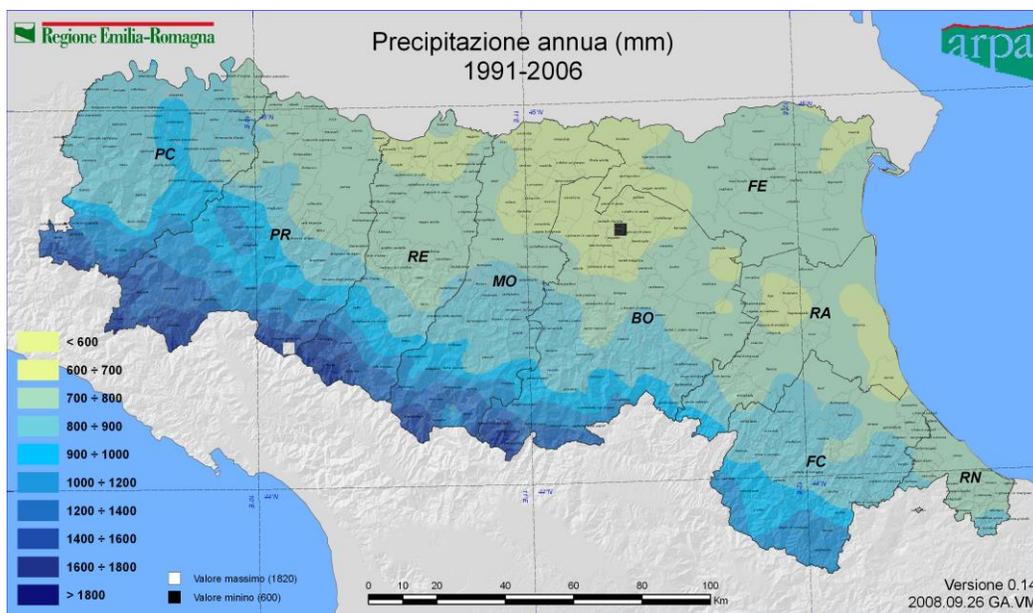


Figura 20. Mappa della precipitazione media annua 1991-2006 per il territorio della Regione Emilia Romagna (www.arpa.emr.it/cms3/documenti/_cerca_doc/meteo/clima/prec91-06.png).

L'ARPA Emilia Romagna applica un ordinary kriging in due fasi separate per produrre mappe di precipitazione cumulata giornaliera a partire dalle osservazioni raccolte da circa 300 stazioni. Seguendo una procedura proposta dal Joint Research Center (ec.europa.eu/jrc), nel primo step sono interpolati i valori 0-1 assegnati alle stazioni a seconda che si sia verificata precipitazione o meno. Le celle della griglia di interpolazione con valori maggiori di 0.5 sono considerate celle con precipitazione. Su tali celle in un secondo momento vengono mappati i valori di precipitazione non nulli misurati presso le stazioni. Questo procedimento in teoria aiuta ad evitare di produrre valori spuri di precipitazione molto bassa (Fig. 20).

È evidente dagli esempi offerti che i metodi geostatistici costituiscono la scelta più frequente per la realizzazione di mappe climatologiche di precipitazione da parte dei servizi meteorologici regionali italiani. In particolare il metodo ordinary kriging (attualmente utilizzato anche per l'Atlante Climatico Trentino) trova un'ampia applicazione.

4.5 Il metodo adottato per l'Atlante

4.5.1 Il confronto tra metodi geostatistici

Alla luce della rassegna degli approcci utilizzati nella letteratura e nella pratica (Sezioni 4.3 e 4.4), e alla luce della disponibilità di osservazioni di precipitazione (Sezione 4.2), si sono selezionati tre diffusi e consolidati

metodi geostatistici (corrispondenti allo stato dell'arte) da confrontare tra loro per la produzione delle mappe mensili, stagionali e annuali di precipitazione cumulata media sui trentenni di riferimento 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010 per l'Atlante Climatico. I tre metodi scelti sono "ordinary kriging" (quello attualmente applicato), "residual kriging" adottando un trend lineare con la quota del terreno e "residual kriging" adottando un trend lineare con latitudine, longitudine e quota del terreno (vedi Sezione 2.2.2). Si ricorda che il kriging residuale con trend lineare in dipendenza dalle tre coordinate spaziali corrisponde esattamente ad un "kriging with external drift" (kriging con drift esterno, KED) che considera quota e coordinate geografiche come predittori.

Per avere un'ulteriore conferma della necessità di includere le coordinate spaziali come predittori nella procedura di interpolazione tramite la determinazione esplicita di un trend lineare rispetto a longitudine, latitudine e quota, si sono calcolati separatamente i coefficienti di correlazione lineare tra le osservazioni e ogni singolo predittore (Tab. 1 e 2). Da questa analisi la correlazione positiva tra quota e precipitazione risulta evidente, molto più pronunciata nei mesi più caldi (da maggio a settembre) come anticipato (vedi Sezione 4.1). Negli altri mesi i valori più significativi sono invece associati alle coordinate geografiche, con una sistematica diminuzione della precipitazione cumulata in direzione SW-NE (cfr. Sezione 4.1). I tre trentenni considerati mostrano tutti un quadro analogo.

Tabella 1. Valori di correlazione lineare tra le medie trentennali di precipitazione mensile cumulata (il singolo mese è indicato dalla sua iniziale) e le coordinate geografiche (X = longitudine, Y = latitudine, Z = quota). I valori assoluti più o meno elevati, e quindi il livello di correlazione, sono indicati dall'intensità di colore, blu per i valori positivi e rosso per i valori negativi.

1961-1990												
	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
X	-0.454	-0.491	-0.505	-0.482	-0.205	0.173	0.123	0.050	-0.057	-0.187	-0.337	-0.437
Y	-0.583	-0.445	-0.428	-0.375	-0.222	-0.190	-0.046	-0.153	-0.138	-0.531	-0.424	-0.578
Z	0.132	0.208	0.153	0.227	0.526	0.621	0.657	0.667	0.489	0.252	0.098	0.144
1971-2000												
	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
X	-0.467	-0.403	-0.514	-0.479	-0.236	0.029	0.077	0.013	-0.193	-0.192	-0.362	-0.428
Y	-0.625	-0.518	-0.372	-0.296	-0.152	-0.209	0.025	0.040	-0.266	-0.497	-0.401	-0.630
Z	0.136	0.248	0.218	0.376	0.642	0.633	0.680	0.732	0.441	0.314	0.278	0.187
1981-2010												
	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
X	-0.396	-0.391	-0.335	-0.394	-0.148	0.109	0.149	0.176	-0.040	-0.093	-0.231	-0.402
Y	-0.729	-0.554	-0.539	-0.410	-0.152	-0.239	0.041	-0.010	-0.296	-0.580	-0.387	-0.678
Z	-0.002	0.182	0.176	0.390	0.689	0.681	0.699	0.765	0.493	0.210	0.137	-0.075

Tabella 2. Come in Tab. 1, ma per i valori stagionali e annuali.

1961-1990					
	DGF	MAM	GLA	SON	ANNO
X	-0.463	-0.392	0.122	-0.220	-0.234
Y	-0.529	-0.327	-0.123	-0.430	-0.365
Z	0.152	0.345	0.669	0.291	0.423
1971-2000					
	DGF	MAM	GLA	SON	ANNO
X	-0.443	-0.409	0.041	-0.253	-0.268
Y	-0.596	-0.267	-0.056	-0.418	-0.337
Z	0.178	0.463	0.695	0.354	0.476
1981-2010					
	DGF	MAM	GLA	SON	ANNO
X	-0.415	-0.296	0.148	-0.134	-0.161
Y	-0.667	-0.352	-0.075	-0.455	-0.401
Z	0.002	0.481	0.739	0.276	0.450

I tre diversi algoritmi di interpolazione sono stati scritti in R (www.r-project.org), un linguaggio di programmazione e ambiente di sviluppo specifico per l'analisi statistica dei dati, oltre che software libero ("open source"). Gli script elaborati (vedi Appendice) permettono di leggere i dati di input (le medie delle osservazioni trentennali presso le stazioni pluviometriche), calcolare i semivariogrammi sperimentali, stimare i semivariogrammi teorici, applicare una validazione incrociata del tipo "leave-one-out", calcolarne le statistiche degli errori e infine stimare il campo di precipitazione sull'intero territorio del Trentino. Il modello digitale del terreno sfruttato per l'analisi dei tre metodi di mappatura è stato elaborato a partire dal database ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM V2 (Global Digital Elevation Model Version 2; asterweb.jpl.nasa.gov), ricampionato ad una risoluzione spaziale di 200 metri su un sistema di riferimento del tipo WGS84 (World Geodetic System 1984), proiezione UTM (Universal Transverse Mercator, proiezione Universale Trasversa di Mercatore), zona 32.

Per la stima dei semivariogrammi teorici (a partire da quelli sperimentali calcolati sulla scorta delle osservazioni) si è deciso di adottare un modello sferico (Journel e Huijbregts, 1987), definito dalla formula:

$$\gamma(h) = \begin{cases} n+s \cdot \left(1.5\frac{h}{a} - 0.5\left(\frac{h}{a}\right)^3\right) & h \leq a \\ n+s & h > a \end{cases}$$

dove γ è il valore del semivariogramma, h è la distanza, n è il valore di "nugget" (il valore assunto dal semivariogramma all'origine), s è il valore

di “sill” (il valore asintotico del semivariogramma a meno di n), a è il “practical range”, ovvero la distanza massima di correlazione oltre la quale il semivariogramma non cresce più (vedi Fig. 21).

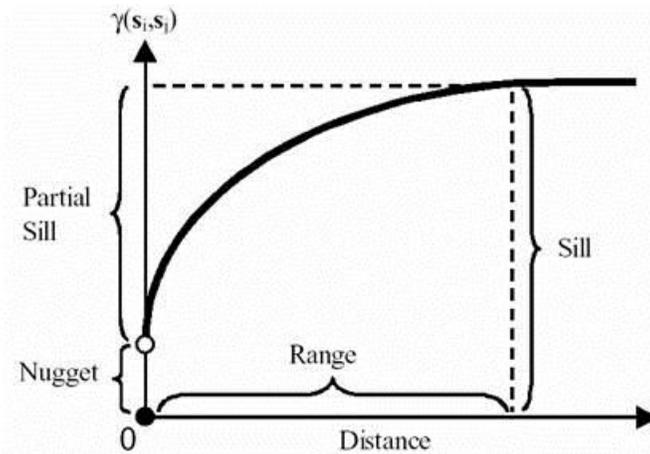


Figura 21. Rappresentazione schematica di un modello teorico di semivariogramma, con l'indicazione dei diversi parametri che ne identificano la struttura.

Per rendere sempre applicabili le procedure di interpolazione da confrontare sono state predisposte delle procedure di stima del semivariogramma teorico anche nel caso in cui il semivariogramma sperimentale non porti alla stima affidabile di un modello utilizzabile. In particolare, è stato ipotizzato un semivariogramma teorico di default (che viene utilizzato quando la stima non è possibile), dove n è nullo, s è pari alla varianza della variabile analizzata (le osservazioni originali nel caso di ordinary kriging, i residui rispetto ai trend lineari spaziali nel caso del residual kriging) e a è pari a 25 km (il valore mediamente assunto dai practical range stimati regolarmente). Questo approccio assicura la possibilità di applicare l'interpolazione delle climatologie anche se la scarsità di osservazioni o la loro distribuzione peculiare dovesse limitare la possibilità di modellarne la struttura di correlazione spaziale, evenienza non troppo rara data la scarsità di stazioni disponibili. In media la distanza media tra una stazione e tutte le altre è di circa 40 km, mentre in un raggio di 25 km ricadono in media 7 stazioni, che salgono a 10 allargando il raggio della finestra mobile a 30 km. Si tenga presente che il “practical range” a dei semivariogrammi rappresenta nei fatti il raggio della finestra mobile utilizzata per l'interpolazione, assodato che la

correlazione tra osservazioni è nulla oltre tale distanza limite (Journel e Huijbregts, 1987).

I risultati della procedura di validazione incrociata per i tre metodi confrontati e per i tre trentenni di analisi sono riportati nelle Tabelle 3-8:

Tabella 3. Valori di errore medio (MBE, Mean Bias Error), errore assoluto medio (MAE, Mean Absolute Error), errore quadratico medio (RMSE, Root Mean Square Error) per la procedura di validazione incrociata delle osservazioni mensili del trentennio 1961-1990 espressi in mm. OK indica ordinary kriging, RKz indica residual kriging con trend lineare con la quota, RKxyz indica residual kriging con trend lineare con coordinate geografiche e quota.

	MBE			MAE			RMSE		
	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz
gennaio	0.6	0.5	0.1	8.0	7.7	7.1	11.0	10.7	9.5
febbraio	0.3	0.1	-0.1	8.2	7.8	6.4	11.1	10.5	8.3
marzo	0.6	0.4	0.0	9.6	8.9	7.2	12.6	11.9	10.3
aprile	1.0	0.5	0.0	14.4	12.5	11.5	19.8	18.0	15.9
maggio	1.1	0.5	0.1	15.8	11.8	10.6	20.5	17.4	16.2
giugno	0.6	0.1	0.1	13.6	9.3	9.3	17.1	13.4	12.8
luglio	0.6	-0.1	0.0	10.8	8.7	8.7	15.0	13.5	13.4
agosto	0.6	0.1	0.0	11.4	8.8	9.1	15.3	11.7	11.6
settembre	0.2	-0.2	-0.3	11.0	8.5	8.1	13.9	11.5	10.6
ottobre	0.7	0.5	0.2	13.2	11.4	9.2	17.3	15.0	11.9
novembre	0.5	0.4	0.0	14.3	13.9	12.3	18.7	18.3	16.6
dicembre	0.5	0.4	0.1	7.8	7.2	6.5	10.9	10.4	8.9

Tabella 4. Come in Tab. 3, ma gli errori sono espressi in termini relativi, come percentuale della precipitazione media mensile su tutte le stazioni (%).

	MBE			MAE			RMSE		
	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz
gennaio	1.0	0.8	0.2	13.8	13.3	12.3	19.0	18.5	16.3
febbraio	0.5	0.2	-0.2	15.1	14.3	11.7	20.4	19.3	15.3
marzo	0.9	0.6	0.0	13.6	12.6	10.1	17.9	16.9	14.6
aprile	1.0	0.5	0.0	15.2	13.2	12.2	20.9	19.0	16.8
maggio	0.9	0.4	0.1	13.3	9.9	9.0	17.3	14.6	13.7
giugno	0.6	0.1	0.1	12.5	8.6	8.5	15.7	12.3	11.8
luglio	0.6	-0.1	0.0	10.8	8.7	8.7	15.0	13.5	13.4
agosto	0.6	0.1	0.0	10.4	8.1	8.4	14.0	10.7	10.6
settembre	0.2	-0.2	-0.4	12.4	9.5	9.0	15.6	13.0	11.9
ottobre	0.7	0.5	0.2	13.0	11.2	9.1	17.1	14.8	11.7
novembre	0.5	0.4	0.0	13.9	13.5	12.0	18.3	17.8	16.2
dicembre	0.9	0.7	0.2	13.7	12.6	11.4	19.0	18.2	15.5

Tabella 5. Come in Tab. 3, ma per il trentennio 1971-2000.

	MBE			MAE			RMSE		
	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz
gennaio	0.5	0.4	0.0	8.1	7.5	6.3	11.0	10.3	8.4
febbraio	0.3	0.1	-0.1	7.2	6.6	6.0	9.4	8.8	7.3
marzo	0.6	0.3	0.0	9.4	8.3	7.0	11.7	10.5	9.5
aprile	1.2	0.5	0.1	15.5	11.6	10.4	20.7	16.3	14.6
maggio	1.4	0.8	0.3	15.3	10.4	9.2	20.8	16.5	14.6
giugno	0.9	0.3	0.2	14.2	10.3	9.0	19.1	14.7	13.1
luglio	0.9	0.2	0.2	10.5	9.0	9.2	14.9	13.0	12.7
agosto	0.8	0.3	0.2	10.3	8.7	8.5	14.4	11.3	10.7
settembre	0.6	0.3	-0.1	11.7	9.0	7.9	16.5	13.3	11.3
ottobre	1.2	1.0	0.5	17.0	14.0	11.3	23.3	19.9	15.5
novembre	1.0	0.7	0.2	13.1	11.7	10.2	17.3	15.5	13.5
dicembre	0.6	0.5	0.0	8.8	7.5	5.8	11.6	10.3	8.2

Tabella 6. Come in Tab. 4, ma per il trentennio 1971-2000

	MBE			MAE			RMSE		
	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz
gennaio	0.9	0.7	0.0	13.6	12.6	10.6	18.6	17.4	14.1
febbraio	0.5	0.2	-0.1	15.5	14.2	12.9	20.1	18.8	15.7
marzo	0.8	0.5	0.0	13.9	12.2	10.4	17.3	15.4	14.0
aprile	1.3	0.5	0.1	16.2	12.1	10.9	21.7	17.1	15.3
maggio	1.3	0.7	0.3	13.3	9.0	8.0	18.1	14.4	12.7
giugno	0.8	0.3	0.1	12.3	8.9	7.8	16.6	12.8	11.4
luglio	0.8	0.2	0.2	10.1	8.6	8.8	14.2	12.4	12.2
agosto	0.9	0.3	0.2	10.6	9.0	8.7	14.8	11.6	11.0
settembre	0.6	0.3	-0.1	11.5	8.9	7.8	16.3	13.2	11.2
ottobre	0.9	0.8	0.4	12.6	10.4	8.4	17.4	14.8	11.5
novembre	1.1	0.8	0.2	14.9	13.3	11.6	19.6	17.6	15.4
dicembre	0.9	0.8	0.0	14.1	12.0	9.3	18.5	16.5	13.2

Tabella 7. Come in Tab. 3, ma per il trentennio 1981-2010.

	MBE			MAE			RMSE		
	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz
gennaio	0.2	0.2	0.1	5.1	5.2	4.7	6.3	6.3	5.9
febbraio	0.0	0.0	-0.1	4.2	4.0	3.2	5.1	4.8	4.0
marzo	0.3	0.1	0.0	7.0	6.0	4.9	8.2	7.2	6.0
aprile	0.8	0.3	0.1	11.4	8.6	6.9	14.5	11.1	9.0
maggio	1.2	0.4	0.3	11.5	7.3	6.3	15.8	10.4	8.5
giugno	1.2	0.4	0.2	10.7	7.3	6.3	14.6	10.1	8.1
luglio	1.2	0.6	0.6	10.5	9.5	9.5	14.3	11.3	11.1
agosto	1.2	0.6	0.4	9.5	6.7	6.2	13.7	8.5	8.0
settembre	1.0	0.5	0.4	10.9	8.3	7.7	14.3	10.7	9.8
ottobre	1.0	0.8	0.5	12.8	10.9	9.0	16.4	13.5	10.6
novembre	0.9	0.7	0.5	13.1	12.1	11.3	16.6	15.5	14.0
dicembre	0.4	0.4	0.3	6.0	6.3	5.6	7.7	8.0	7.5

Tabella 8. Come in Tab. 4, ma per il trentennio 1981-2010.

	MBE			MAE			RMSE		
	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz	OK	RKz	RKxyz
gennaio	0.4	0.4	0.2	11.1	11.1	10.2	13.6	13.7	12.7
febbraio	0.1	0.0	-0.2	11.0	10.5	8.4	13.3	12.5	10.4
marzo	0.5	0.2	0.1	11.7	10.1	8.2	13.8	12.2	10.1
aprile	0.9	0.3	0.1	12.3	9.3	7.4	15.6	12.0	9.7
maggio	1.1	0.3	0.3	10.4	6.6	5.7	14.4	9.4	7.7
giugno	1.1	0.4	0.2	10.1	6.9	6.0	13.9	9.6	7.7
luglio	1.2	0.6	0.6	10.6	9.5	9.5	14.3	11.3	11.1
agosto	1.2	0.6	0.4	9.6	6.8	6.3	13.9	8.6	8.1
settembre	1.0	0.6	0.4	11.5	8.7	8.0	15.0	11.2	10.2
ottobre	0.8	0.6	0.4	10.7	9.0	7.5	13.6	11.2	8.8
novembre	0.8	0.6	0.5	11.4	10.5	9.9	14.5	13.5	12.2
dicembre	0.6	0.6	0.5	8.7	9.1	8.0	11.2	11.6	10.8

Tutti e tre gli algoritmi di interpolazione appaiono pressoché privi di bias, ovvero di errore sistematico, che rimane tipicamente attorno alla soglia dell'1%, ovvero trascurabile. In particolare le due tipologie di residual kriging assicurano i valori di MBE più piccoli. Per quanto concerne gli errori assoluti e gli errori quadratici medi essi assumono valori compresi tra 5% e 20% circa, più alti i secondi dei primi, e più alti in media per i trentenni 1961-1990 e 1971-2000 che per il 1981-2010. In generale, l'accuratezza dei metodi di interpolazione appare migliore nei mesi estivi che in quelli invernali, nei quali gli errori sono sistematicamente più elevati per tutti e tre i metodi considerati. La considerazione esplicita di un trend spaziale globale all'interno dei dati (ovvero l'utilizzo del residual kriging) consente di migliorare praticamente sempre la performance rispetto all'ordinary kriging (il metodo attualmente in uso), specialmente nei mesi caldi, nei quali il guadagno di accuratezza è più evidente (alcuni punti percentuali). Inoltre, in media anche il residual kriging con trend calcolato sulla base delle tre direzioni spaziali performa meglio del kriging che adotta trend lineare solo con la quota del terreno. Questo porta finalmente a scegliere come metodo di mappatura il metodo più sofisticato, anche conosciuto come "kriging con drift esterno", che consente di raggiungere accuratezze medie dell'ordine dell'8-10% (in termini di MAE) o 10-14% (in termini di RMSE).

Come si può apprezzare in Fig. 22 e 23, i valori degli errori presso le singole stazioni sono molto diversi tra loro, anche in relazione alla stagione di riferimento. Sono tipicamente poco elevati gli errori di validazione incrociata registrati presso le stazioni di fondovalle, mentre le

stazioni in quota o situate ai margini del dominio di interpolazione (cioè ai confini provinciali) sono ragionevolmente affette da errori più rilevanti, che toccano anche valori pari al 30-40%. Non è molto chiaro invece il pattern stagionale degli errori di stima, che manca della sistematicità individuata nell'analisi degli errori medi su tutto l'insieme di stazioni. In molti casi inverno ed estate corrispondono ad errori elevati e ridotti rispettivamente, ma non univocamente e per ogni stazione.

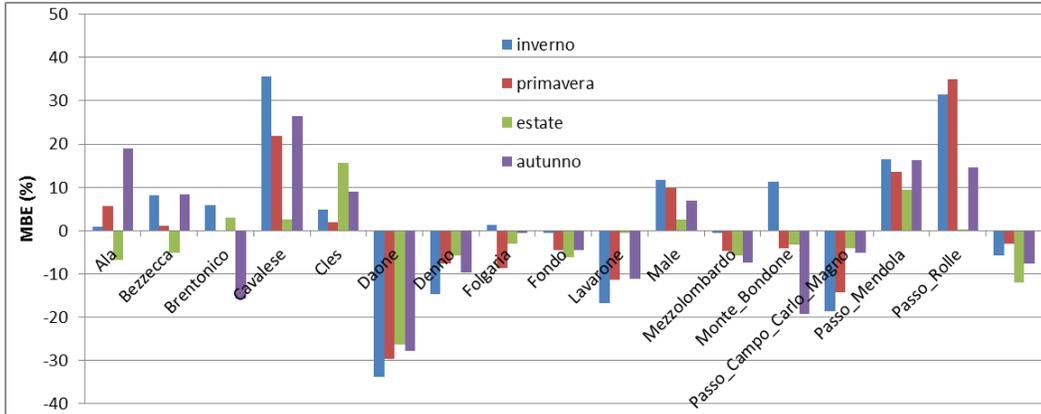


Figura 22. Errori di validazione incrociata percentuali per le singole stazioni calcolati sulle stime di precipitazione media stagionale (trentennio 1981-2010) in relazione ai risultati dell'interpolazione tramite residual kriging con trend lineare rispetto a longitudine, latitudine e quota. Primo gruppo di stazioni pluviometriche.

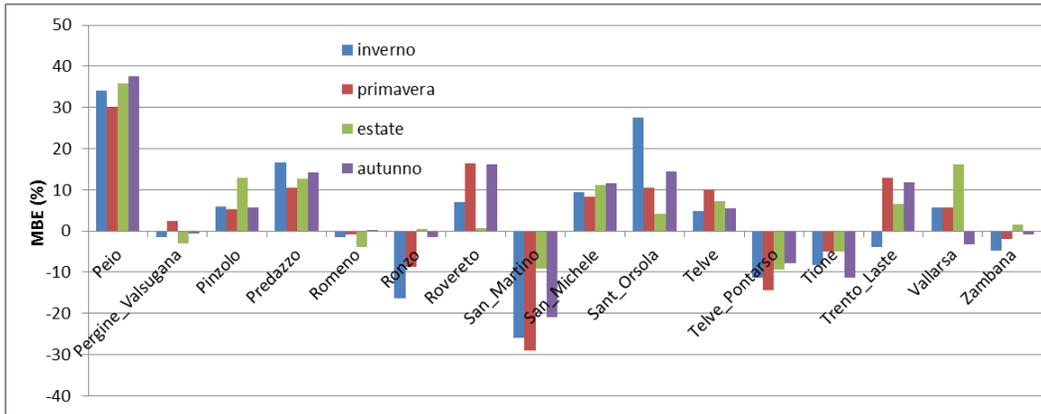


Figura 23. Come Fig. 22, ma per il secondo gruppo di stazioni pluviometriche.

4.4.2 I risultati della mappatura

Selezionato il metodo di mappatura da implementare per l'Atlante Climatico del Trentino, uno script definitivo è stato predisposto per essere collegato all'output grafico (mappe di precipitazione) da mostrare sul sito

web dell'Atlante (vedi Appendice). Al momento la procedura di aggiornamento del metodo di interpolazione non è ancora stata completata, ma si forniscono in questa sede alcuni confronti tra mappe finali ottenute con il nuovo metodo scelto e il metodo prima in uso, allo scopo di esemplificare i miglioramenti attesi.

Per il mese di gennaio (1981-2010; Fig. 24-27) la differenza più rilevante si ha quando si ricorre al metodo KED scelto definitivamente, ovvero quando si tiene conto esplicitamente del gradiente SW-NE presente sul territorio (Fig. 27). A quel punto anche la dipendenza dalla quota appare più evidente che nella mappa ottenuta con il residual kriging che considera solo l'elevazione del terreno (Fig. 26). Questo conferma le speculazioni esposte nelle sezioni precedenti a proposito dell'importanza maggiore dei fenomeni di precipitazione di tipo stratiforme nei mesi invernali, nella fattispecie l'effetto della catena alpina come ostacolo allo spostamento delle masse d'aria verso nord e il conseguente effetto di ombra pluviometrica.

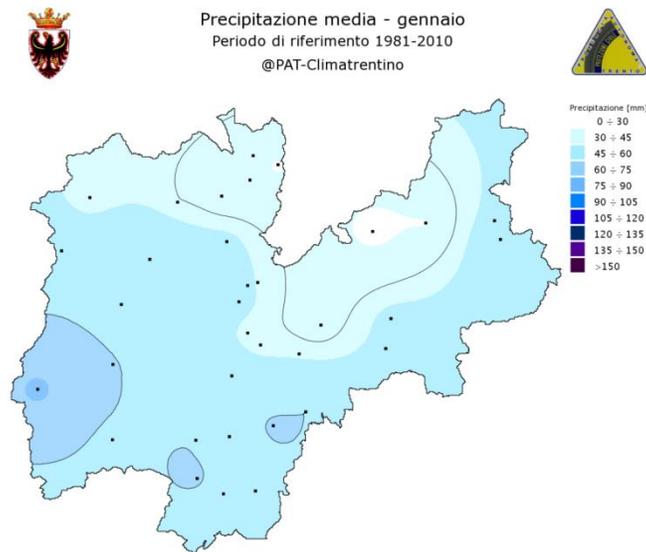


Figura 24. Mappa della precipitazione media di gennaio (1981-2010) pubblicata sul sito web dell'Atlante Climatico.

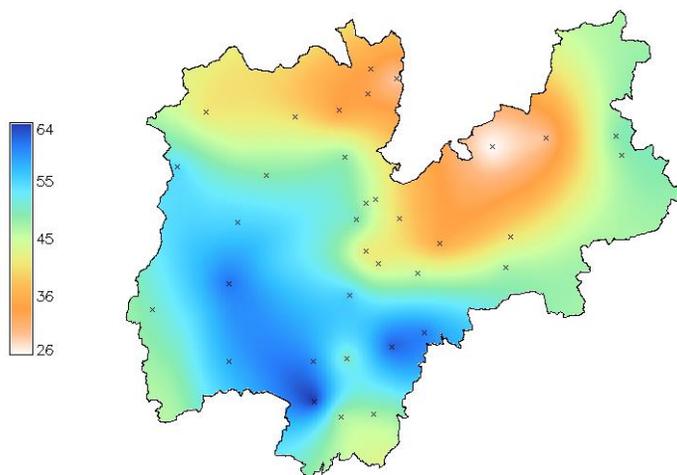


Figura 25. Mappa della precipitazione media di gennaio (1981-2010) in mm, ottenuta con il metodo ordinary kriging (del tutto corrispondente a Fig. 22).

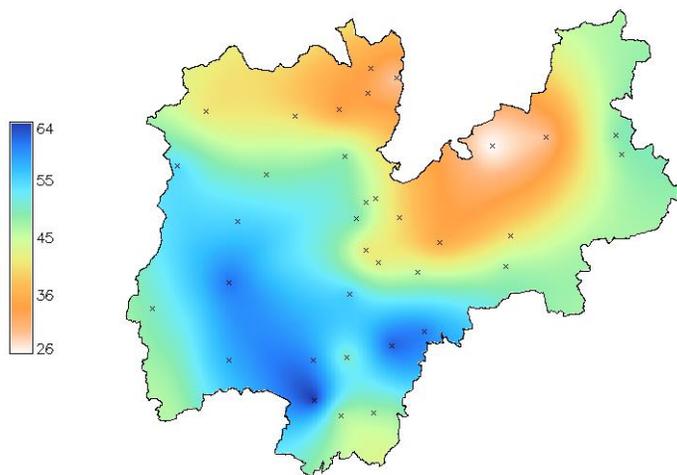


Figura 26. Come in Fig. 23, ma per il metodo residual kriging che adotta un trend lineare solo con la quota del terreno (mm di precipitazione).

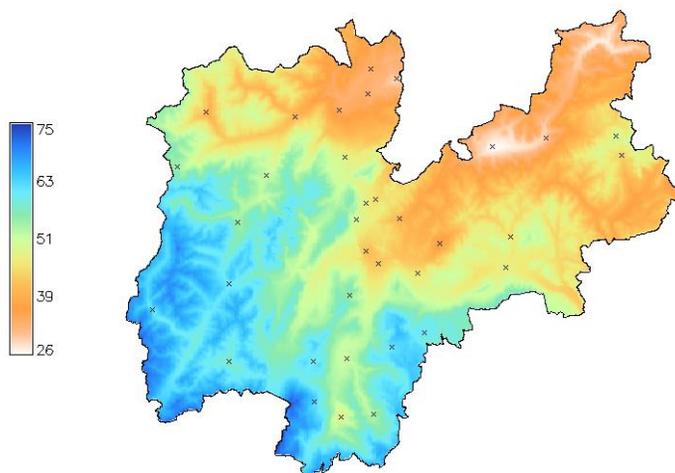


Figura 27. Come in Fig. 23, ma per il metodo residual kriging che adotta un trend lineare con le coordinate geografiche e la quota del terreno (mm di precipitazione).

La Figura 28 (e Fig. 29) invece rappresenta la mappa di precipitazione ottenuta con l'ordinary kriging per il mese estivo di giugno. Le mappe corrispondenti (Fig. 30 e 31) ottenute con i metodi del tipo residual kriging mostrano entrambe una chiara struttura esclusivamente governata dalla topografia regionale. In effetti la differenza tra le due non è apprezzabile facilmente dal solo punto di vista grafico. Questo riflette molto bene il concetto espresso precedentemente, che vede riconosciuta l'importanza

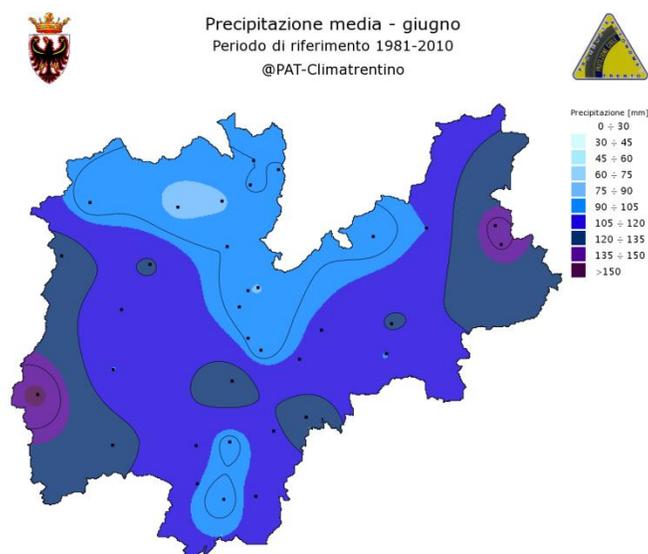


Figura 28. Come in Fig. 24, ma per il mese di giugno.

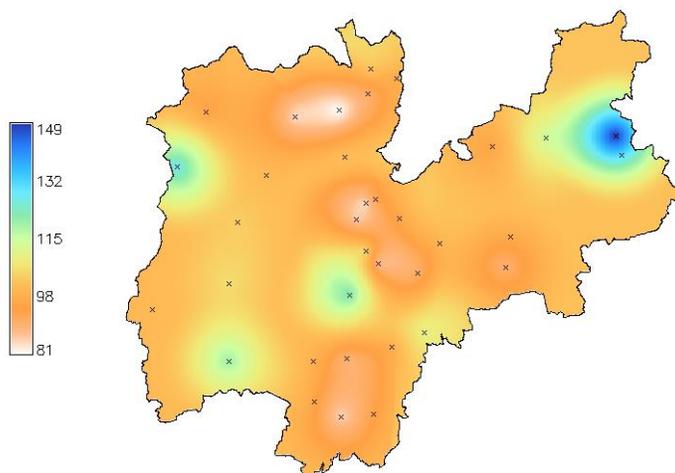


Figura 29. Come in Fig. 25, ma per il mese di giugno.

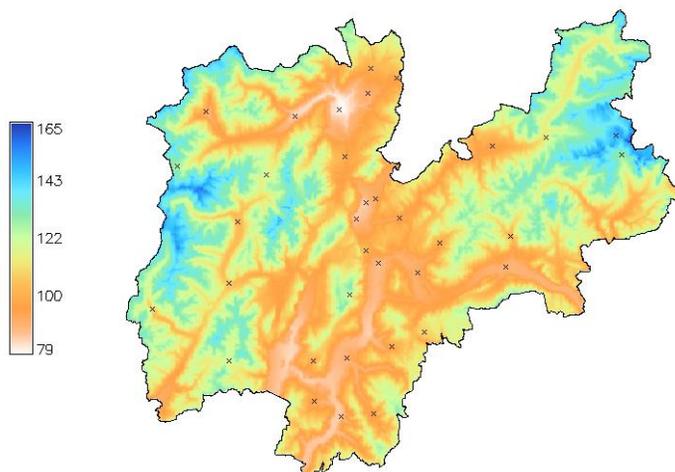


Figura 30. Come in Fig. 26, ma per il mese di giugno.

primaria delle precipitazioni a carattere convettivo (che si intensificano sui rilievi appunto) durante la stagione estiva.

I due esempi sopra riportati mostrano chiaramente la differenza a livello qualitativo tra le mappe prodotte con il metodo ordinary kriging e le mappe prodotte con il metodo KED scelto (oltre al passaggio intermedio rappresentato dal kriging residuale con trend verticale puro). Se alla maggior accuratezza del metodo sommiamo l'aspetto più realistico fornito dalla chiara impronta topografica dei risultati mostrati, possiamo definitivamente assegnare una preferenza al metodo di interpolazione Kriging con External Drift.

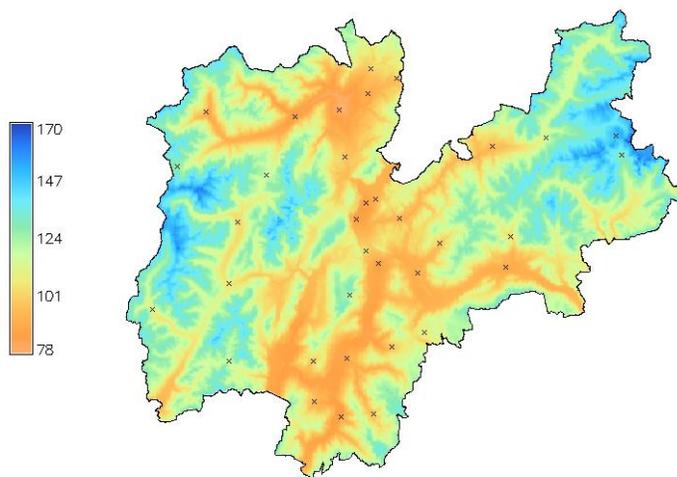


Figura 31. Come in Fig. 27, ma per il mese di giugno.

5 Mappatura di altre variabili meteo-climatiche

Radiazione solare, vento e neve, ma anche temperatura e precipitazione, sono stati oggetto di alcuni specifici sotto-progetti nell'ambito del progetto Atlante Climatico del Trentino. In particolare l'anno scorso il Gruppo di Fisica dell'Atmosfera del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento si è occupato di tre pacchetti di lavoro:

- l'Atlante Solare (responsabile: ing. Lavinia Laiti),
- l'Atlante Eolico (responsabile: ing. Lorenzo Giovannini),
- l'Analisi delle situazioni sinottiche e dei tipi di tempo (responsabile: dott. Luca Panziera).

Non sono state intraprese azioni specifiche per la definizione dei metodi di mappatura o per la pubblicazione di eventuali dati e risultati per le variabili meteo-climatiche analizzate nell'ambito dell'Atlante Climatico del Trentino da altri gruppi (neve e ghiacciai, portate idriche, etc.).

5.1 L'Atlante Solare del Trentino

5.1.1 La spazializzazione della radiazione solare

Il progetto per l'Atlante Solare del Trentino si è concluso a fine 2014. In riferimento al periodo 2004-2012 sono state prodotte dodici mappe medie mensili e una mappa media annuale di radiazione solare globale su superficie orizzontale per il Trentino, con una risoluzione di 200 metri. Nell'ambito di questa attività di studio e ricerca:

- è stato messo a punto un algoritmo condiviso con la Fondazione E. Mach di controllo di qualità dei dati orari e giornalieri di radiazione globale, sulla scorta di quanto indicato dalla letteratura scientifica recente;
- sono stati sottoposti a controllo di qualità, omogenizzazione e stima dei dati mancanti tutti i dati di radiazione raccolti dal 1987 al 2012 sul territorio trentino dalle reti osservative di Meteotrentino e della Fondazione E. Mach;
- sono state calcolate le climatologie mensili e annuali di radiazione solare per un set di 25 stazioni selezionate caratterizzate da un'ottima qualità del dato;

- è stato reperito e analizzato un dataset di radiazione solare da immagini satellitari realizzato da MeteoSvizzera (HelioMont; Stöckli, 2013);
- è stato messo a punto e calibrato un modello di radiazione solare in condizioni di cielo sereno, basato su un sistema informativo geografico in grado di riprodurre gli effetti topografici ad alta risoluzione sulla stima della radiazione solare massima teorica;
- dopo aver testato diverse tecniche di mappatura, la radiazione solare globale reale media alla superficie su tutto il territorio trentino è stata stimata grazie ad un metodo di tipo kriging residuale, anche detto kriging con drift esterno, assumendo un trend lineare rispetto alla quota del terreno;
- sono stati posti a confronto i database di radiazione a disposizione degli utenti potenziali (PVGIS-3, PVGIS-CMSAF, HelioMont) con quello elaborato, e sono state evidenziate e discusse le discrepanze tra di essi;
- sono stati confrontati molti modelli di separazione della radiazione globale in diretta e diffusa disponibili in letteratura scientifica, sulla scorta dei dati raccolti presso l'Aeroporto di Bolzano dall'Istituto per le Energie Rinnovabili di EURAC;
- è stata valutata l'applicabilità di un modello di separazione tarato localmente alla mappatura separata della radiazione diffusa e diretta per il territorio trentino.

Per ulteriori dettagli tecnici sulla metodologia di mappatura della radiazione solare adottata si rimanda alla Relazione tecnica dell'Atlante Solare, già depositata presso gli uffici provinciali preposti e disponibile al link climatlas.fbk.eu/static/Relazione_Atlante_Solare_Trentino.pdf.

5.1.2 Altre attività

I risultati intermedi e definitivi dell'Atlante Solare del Trentino sono stati presentati a livello locale in più occasioni, in particolare:

- al workshop finale del progetto 3DSolarWeb della Fondazione B. Kessler e MPA Solutions (Trento, 12 dicembre 2013);
- durante il ciclo di seminari interni organizzato dai Gruppi di ricerca in Idraulica, Idrologia e Fisica dell'Atmosfera del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento (Trento, 23 gennaio 2014);

- in occasione del meeting finale del progetto PV-Alps di EURAC (Bolzano, 25 luglio 2014);
- come seminario esterno durante le lezioni del corso “Energie Rinnovabili” del prof. Maurizio Grigante nell’ambito del corso di Laurea in Ingegneria Energetica dell’Università di Trento (Trento, ottobre 2014 e 2015), allo scopo di pubblicizzare e diffondere le informazioni relative al progetto dell’intero Atlante Climatico.

Inoltre sono state offerte numerose presentazioni, sia orali che in forma di poster, dei risultati anche a conferenze e meeting scientifici internazionali:

- European Geophysical Union General Assembly 2014 e 2015 (Vienna, Austria);
- 16th AMS Conference on Mountain Meteorology (San Diego, California, agosto 2014);
- 5th International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean (Istanbul, marzo 2015);
- meeting annuale della Associazione Italiana di AgroMeteorologia 2015 (San Michele all’Adige, Italia);
- 3rd International Conference on Energy and Meteorology (Boulder, Colorado, giugno 2015);
- 33rd International Conference on Alpine Meteorology (Innsbruck, Austria, settembre 2015).

Oltre alla relazione finale del progetto, è stato pubblicato un articolo su rivista scientifica basato sui risultati preliminari dell’Atlante (“A Solar Atlas for the Trentino Region in the Alps: Quality Control of Surface Radiation Data”, pubblicata su Energy Procedia, volume 59, pagine 336–343, anno 2014), e altri articoli sul confronto tra modelli di separazione e sui risultati finale dell’Atlante sono in via di revisione e scrittura.

La pubblicazione delle mappe di radiazione solare sul sito web dell’Atlante Climatico (Fig. 32) è stata curata direttamente dal Gruppo di Fisica dell’Atmosfera per quanto concerne i contenuti, in stretta collaborazione con il team della Fondazione B. Kessler per l’implementazione pratica. In particolare sono state predisposte quattro pagine web che illustrano molto brevemente, in termini didattici e semplici, alcuni concetti generali sulla radiazione solare, oltre alle finalità, alle caratteristiche e alle modalità di realizzazione dell’Atlante Solare del Trentino (vedi Figure 33-36). I testi di tali pagine sono stati condivisi con gli altri partner del progetto dell’Atlante Climatico, allo scopo di elaborare

dei contenuti contraddistinti da correttezza scientifica e tecnica, ma allo stesso tempo di facile comprensione.

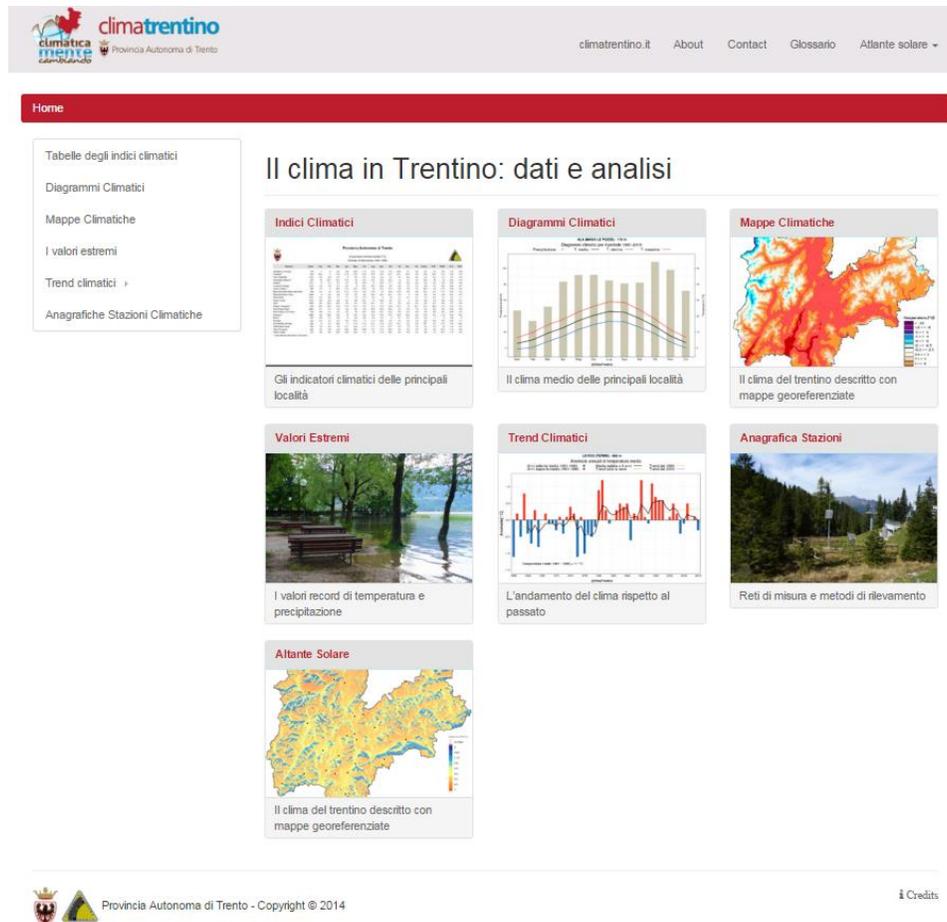


Figura 32. Screenshot della home page del sito web dell'Atlante Climatico. È possibile notare in basso a sinistra il riquadro che rimanda alle pagine dedicate all'Atlante Solare, assieme alla voce con menu a tendina all'estrema destra nella barra grigia in alto.

- Tabelle degli indici climatici
- Diagrammi Climatici
- Mappe Climatiche
- I valori estremi
- Trend climatici >
- Anagrafiche Stazioni Climatiche

La Radiazione Solare

La **radiazione globale** rappresenta la radiazione solare totale che riesce a raggiungere la superficie terrestre, al netto dei fenomeni di assorbimento e riflessione (verso lo spazio) atmosferici. È composta da una percentuale di **radiazione diretta** (quella che attraversa l'atmosfera terrestre senza alterazioni) e da una quota di **radiazione diffusa** (quella che viene diffusa e riflessa verso la superficie terrestre dalle nubi e da gas e particolati atmosferici).

La variabilità spaziale della radiazione globale e delle sue componenti dipende da numerosi elementi. In primo luogo essa è controllata da **fattori astronomici e geometrici** (legati ai moti di rotazione e rivoluzione della Terra), che inducono variazioni di irraggiamento giornaliero e stagionali in funzione della latitudine del punto di interesse. In secondo luogo, importanti variazioni sono determinate dalle modificazioni associate ai **fattori orografici** locali, ovvero alle ombre orografiche, alla pendenza e all'esposizione locale del terreno e alla variazione dello spessore dell'atmosfera in funzione della quota del terreno. Questi aspetti sono particolarmente rilevanti in presenza di un territorio montuoso come quello del Trentino. Infine, le **condizioni atmosferiche** di nuvolosità e torbidità atmosferica locali influenzano ulteriormente la radiazione solare incidente al suolo.



Figura 33. Screenshot della prima pagina web dedicata all'Atlante Solare.

- Tabelle degli indici climatici
- Diagrammi Climatici
- Mappe Climatiche
- I valori estremi
- Trend climatici >
- Anagrafiche Stazioni Climatiche

L'Atlante Solare del Trentino

L'**Atlante Solare del Trentino** è costituito da mappe che stimano la radiazione solare globale cumulata giornaliera mediamente disponibile su base mensile e annuale, con una **risoluzione spaziale** elevata, pari a 200 metri. La maggior parte degli atlanti solari preesistenti e attualmente disponibili, come l'Atlante Solare della Radiazione Solare o PVGIS, sono costituiti da mappe con una risoluzione insufficiente rispetto alla complessità morfologica del territorio trentino, dell'ordine di pochi chilometri.

Grazie al loro livello di dettaglio, le mappe dell'Atlante possono servire da riferimento per l'accurata valutazione del **potenziale solare** fotovoltaico, termico e termodinamico di un sito, o per l'individuazione di nuovi siti particolarmente favorevoli per l'installazione di impianti solari.

Per ulteriori dettagli scarica la Relazione finale dell'Atlante solare.



Figura 34. Screenshot della seconda pagina web dedicata all'Atlante Solare.



Figura 35. Screenshot della terza pagina web dedicata all'Atlante Solare.



Figura 36. Screenshot della quarta pagina web dedicata all'Atlante Solare.

Oltre ad inserire il link alla versione pdf della Relazione finale e agli articoli scientifici collegati per chi fosse interessato ad approfondire, sono state inoltre completate, in analogia a quanto già effettuato per temperatura e precipitazione, le seguenti sezioni del sito web:

- “Tabelle degli indici climatici”, con la pubblicazione dei valori di radiazione globale giornaliera media mensile e annuale e corrispettivi valori di “clear-sky index” per le 25 stazioni radiometriche utilizzate per l’Atlante;
- “Mappe climatiche”, con la pubblicazione delle 12 mappe mensili e della mappa annuale di radiazione globale giornaliera media (scaricabili come file immagine; Fig. 37);
- “Anagrafica stazioni climatiche”, con l’inserimento delle stazioni radiometriche (contrassegnate dal simbolo del sole; Fig. 38), l’aggiornamento della lista di stazioni e delle loro caratteristiche.

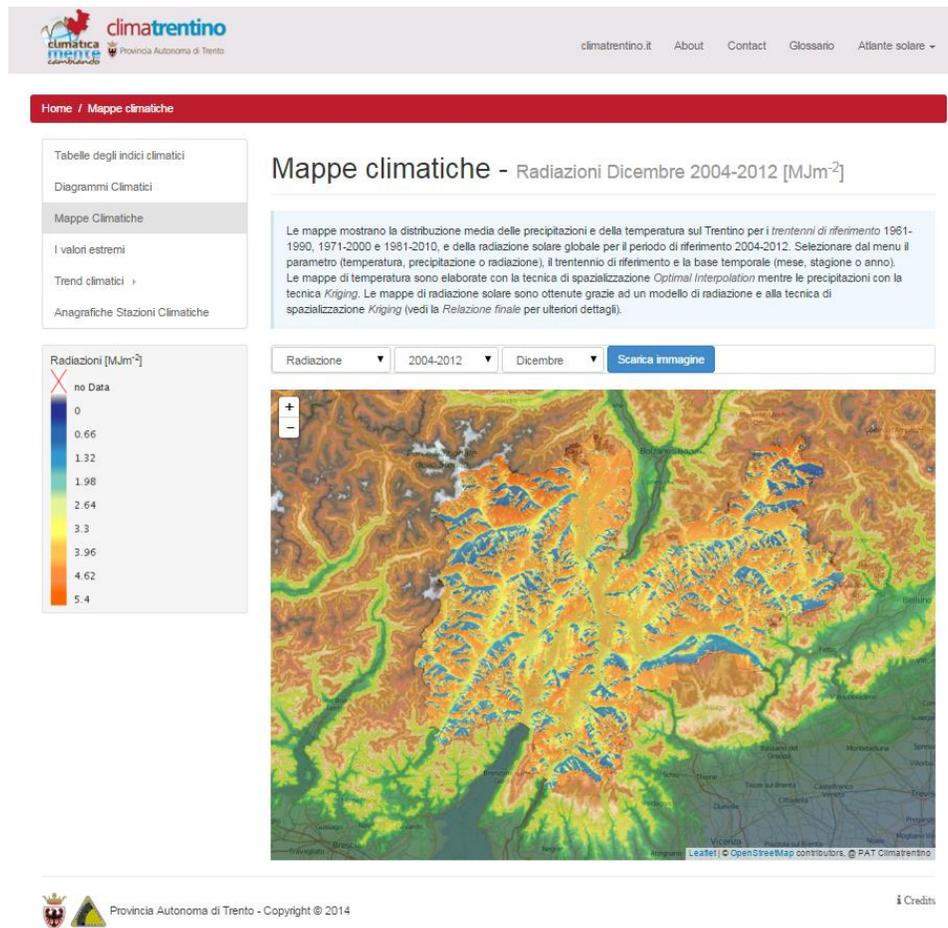


Figura 37. Un esempio di screenshot dal sito web dell’Atlante Climatico che mostra la visualizzazione offerta per le mappe dell’Atlante Solare del Trentino (nello specifico per il mese di dicembre).

The screenshot shows the 'Anagrafica Stazioni Climatiche' page. The header includes the 'clima.trentino' logo and navigation links. The main content area features a table of climate stations. The table has the following columns: Codice, Nome, Dataset, Data Attivazione, Coordinate, and Stato. The 'Stato' column contains a sun icon for radiometric stations. The table lists 10 stations, with the first one being Paneveggio. A sidebar on the left contains navigation links and a legend for precipitation, temperature, and radiation. The footer includes the Provincia Autonoma di Trento logo and copyright information.

Codice	Nome	Dataset	Data Attivazione	Coordinate	Stato
F0008	Paneveggio		01/01/2004	46.3100, 11.7480	☀️
F0012	Passo Vezzena		01/01/2004	45.9610, 11.3140	☀️
F0019	Lavazè		01/01/2004	46.3580, 11.4940	☀️
F0022	Faedo (Maso Togn)		01/01/2004	46.1950, 11.1700	☀️
F0023	Lomaso		01/01/2004	46.0140, 10.8670	☀️
F0024	Baselga di Pinè		01/01/2004	46.1260, 11.2510	☀️
F0029	Arco		01/01/2004	45.9100, 10.8870	☀️
F0052	Molino Vittoria		01/01/2004	46.0660, 11.1160	☀️
F0053	Tremalzo		01/01/2004	45.8420, 10.6840	☀️
F0070	Terlago		01/01/2004	46.0880, 11.0460	☀️

Figura 38. Screenshot della voce “Anagrafica stazioni climatiche”, dove è possibile riconoscere le nuove voci contrassegnate dal simbolo del sole corrispondenti alle stazioni radiometriche.

Da ultimo si è provveduto a far pubblicare sul portale OpenData del Trentino (dati.trentino.it) le mappe di radiazione a piena risoluzione in formato GeoTiff e ASCII, rendendole liberamente accessibili al download, per la visualizzazione e l’eventuale elaborazione da parte di professionisti del settore fotovoltaico, ricercatori e semplici interessati. Le mappe sono accessibili al link:

dati.trentino.it/dataset/atlante-solare-del-trentino-2004-2012.

5.2 L’Atlante Eolico del Trentino

5.2.1 La mappatura della risorsa eolica

La seconda fase del progetto Atlante Eolico si concluderà a breve. L’approccio scelto è quello dell’implementazione di una catena modellistica a domini innestati per raggiungere risoluzioni adatte alla complessa orografia del territorio. In particolare si sono accoppiati i modelli WRF (www.wrf-model.org) e CALMET (www.src.com/calpuff), fino ad arrivare a 0.5 km di risoluzione finale nel dominio più interno

centrato sul Trentino. Grazie alla collaborazione con CISMA S.r.l., sono stati simulati 10 anni di dati, dal 2004 al 2013, sfruttando l'assimilazione dei dati di intensità e direzione del vento osservati presso 23 stazioni al suolo, dopo un attento controllo di qualità degli stessi. Tale procedura è ben documentata e riconosciuta nella letteratura scientifica specialistica. In effetti l'utilizzo di cosiddetti metodi dinamici appare l'unica soluzione percorribile per la mappatura del vento, una grandezza per la quale gli altri metodi di interpolazione spaziale forniscono tipicamente risultati del tutto inattendibili.

L'utilizzo dei modelli prima citati garantisce la disponibilità dei valori di intensità e direzione del vento a diversi livelli verticali. Infatti l'analisi statistica dei risultati si è poi concentrata sul calcolo dell'intensità media mensile e annuale a diverse altezze dal terreno, ma anche sul calcolo dei parametri della distribuzione di probabilità dell'intensità del vento a tali livelli. Si è assunta una distribuzione di probabilità di tipo Weibull, ovvero quella tipicamente utilizzata nella quantificazione della risorsa eolica:

$$p(v) = \frac{k}{\lambda} \cdot \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k\right]$$

dove p è la densità di probabilità, v la velocità del vento, k e λ rispettivamente il parametro di forma (adimensionale) e di scala ($m s^{-1}$) della distribuzione in esame. Per ulteriori dettagli sulla procedura di mappatura della risorsa eolica si rimanda alla Relazione finale del progetto Atlante Eolico, a breve disponibile sul sito web dell'Atlante Climatico stesso oppure su richiesta all'ing. Lorenzo Giovannini (lorenzo.giovannini@unitn.it).

5.2.2 Altre attività

I risultati intermedi e definitivi dell'Atlante Eolico del Trentino sono stati presentati anche a conferenze e meeting scientifici internazionali, in forma sia orale che di poster:

- European Geophysical Union General Assembly 2014 (Vienna, Austria, aprile 2014);
- 3rd International Conference on Energy and Meteorology (Boulder, Colorado, giugno 2015);
- 33rd International Conference on Alpine Meteorology (Innsbruck, Austria, settembre 2015).

Oltre alla relazione finale della prima fase del progetto, è stato già pubblicato un articolo su rivista scientifica basato sui risultati preliminari

dell'Atlante ("Sensitivity of simulated wind speed to spatial resolution over complex terrain", pubblicato su Energy Procedia, volume 59, pagine 323-329, anno 2014), e altri articoli sono in via di revisione e scrittura.

La pubblicazione delle mappe di intensità del vento e dei parametri delle distribuzioni di Weibull sul sito web dell'Atlante Climatico sarà curata nel corso dei prossimi mesi (gennaio-marzo 2016) direttamente dal Gruppo di Fisica dell'Atmosfera per quanto concerne i contenuti, in collaborazione con il team della Fondazione B. Kessler. Sono già stati predisposti i testi di quattro pagine web che illustrano molto brevemente, in termini didattici e semplici, alcuni concetti generali sulla risorsa eolica in ambiente montuoso, oltre alle finalità, alle caratteristiche e alle modalità di realizzazione dell'Atlante eolico del Trentino. I testi sono stati trasmessi alla Fondazione B. Kessler per la definitiva pubblicazione.



Figura 39. Ipotesi di localizzazione dei riquadri che rimandano alle pagine dedicate all'Atlante Eolico e all'Analisi delle situazioni sinottiche sulla nuova home page dell'Atlante Climatico.

Di seguito si riportano i testi proposti.

Pagina 1: Il vento

“In atmosfera il vento spira tipicamente dalle zone ad alta pressione verso quelle a pressione più bassa. A qualunque scala la sua variabilità spazio-temporale dipende essenzialmente dal complesso equilibrio tra tre tipologie di forze: le forze legate ai gradienti di pressione (che sono strettamente associati ai gradienti di temperatura e al riscaldamento della superficie terrestre da parte della radiazione solare), le forze di attrito legate ai processi di dissipazione e la forza di Coriolis (associata al moto di rotazione terrestre).

In particolare l'effetto dell'attrito è molto rilevante nel primo strato di atmosfera a causa della rugosità della superficie terrestre. Questo strato, detto “strato limite atmosferico”, è il più turbolento e quello che risente più direttamente anche del riscaldamento della superficie terrestre. Nella parte inferiore dello strato limite la velocità media del vento tipicamente aumenta con l'altezza, seguendo approssimativamente un profilo logaritmico.

Un territorio montuoso come quello del Trentino è caratterizzato da sistemi periodici di venti locali, che dipendono dalla presenza di solchi vallivi e rilievi montuosi e di laghi, e sono particolarmente sviluppati nella stagione calda. Al contrario, nei mesi più freddi il regime dei venti è più collegato a circolazioni atmosferiche con scale spaziali più ampie (ad esempio, gli episodi di vento intenso detto “foehn”).”

Pagina 2: L'Atlante Eolico del Trentino

“L'Atlante Eolico del Trentino è costituito da mappe di intensità del vento media annua a diverse altezze dal suolo, caratterizzate da una risoluzione spaziale pari a 500 m. L'intensità media del vento rappresenta una prima stima del potenziale eolico di un sito, che è invece pienamente caratterizzato dalla distribuzione di probabilità di Weibull locale:

$$p(v) = \frac{k}{\lambda} \cdot \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k\right]$$

dove p è la densità di probabilità, v la velocità del vento, k e λ rispettivamente il parametro di forma e di scala della distribuzione in esame. Attualmente per il territorio trentino è disponibile solo un Atlante eolico (<http://atlanteeolico.rse-web.it/>) realizzato nel 2002 dal CESI (<http://www.cesi.it/>) in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova e recentemente aggiornato nel 2006 con l'estensione alle zone costiere. Esso fornisce la velocità media del vento alle altezze di 25, 50, 75 e 100 m dal suolo, con una risoluzione pari a circa 1 km.

L'Atlante Eolico del Trentino perciò può costituire una nuova e preziosa risorsa per l'accurata valutazione del potenziale eolico di un sito, per l'individuazione di siti particolarmente favorevoli per l'installazione di nuovi impianti o macchine eolici.

Per ulteriori dettagli scarica la Relazione finale (link al pdf della relazione finale) dell'Atlante Eolico."

Pagina 3: Come è stato realizzato l'Atlante Eolico

"L'Atlante Eolico del Trentino è stato realizzato grazie ad una catena di modelli numerici in cascata a risoluzione spaziale crescente, fino a raggiungere la risoluzione finale di 500 m che garantisce la riproduzione accurata della variabilità del campo di vento su un terreno tanto complesso. I modelli atmosferici utilizzati sono rispettivamente WRF (<http://www.wrf-model.org/index.php>) per arrivare fino a 1.2 km e CALMET (<http://www.src.com/calpuff/>). WRF è inizializzato in primo luogo grazie a rianalisi atmosferiche, mentre all'ultimo passaggio CALMET assimila le osservazioni di intensità e direzione del vento a 10 m dal suolo raccolte presso 23 stazioni di misura selezionate, i cui dati sono stati accuratamente validati e analizzati (link all'articolo su Energy Procedia <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214017512>).

Le simulazioni numeriche coprono un periodo di dieci anni dal 2004 al 2013, e l'analisi statistica dei risultati ha prodotto le mappe di intensità media annua del vento a 10 m, XX e XX metri, e le mappe dei parametri delle distribuzioni di Weibull locali.

Per ulteriori dettagli scarica la Relazione finale (4) dell'Atlante Eolico."

Pagina 4: Le mappe

"Le mappe finali dell'Atlante Eolico mostrano la distribuzione media annuale dell'intensità media del vento sul territorio trentino per il decennio di riferimento 2004-2013. Selezionare dal menu la base temporale di riferimento (mese o anno)." (da integrare con una breve descrizione dei risultati)

Oltre a inserire il link alla versione pdf della Relazione finale del progetto, saranno inoltre completate, in analogia a quanto già effettuato per temperatura, precipitazione e radiazione, le seguenti sezioni del sito web:

- "Tabelle degli indici climatici", con la pubblicazione dei valori di intensità media annua e dei parametri di scala e di forma delle distribuzioni di Weibull per le 23 stazioni utilizzate per l'Atlante;

- “Mappe”, con la pubblicazione delle mappe annuali di intensità media del vento a diverse quote dal terreno (scaricabili come file immagine);
- “Anagrafica stazioni climatiche”, con l’inserimento delle 23 stazioni anemometriche, l’aggiornamento della lista di stazioni e delle loro caratteristiche; come simbolo si propone l’utilizzo di una rappresentazione stilizzata di una manica a vento.

Esistono già accordi verbali per l’immediata pubblicazione sul portale OpenData del Trentino (dati.trentino.it) delle mappe dell’Atlante Eolico in formato GeoTiff e ASCII, in analogia a quanto già fatto per la radiazione solare.

5.3 L’analisi delle situazioni sinottiche e dei tipi di tempo

Il lavoro di analisi e classificazione sinottica è stato effettuato dal dott. Luca Panziera nell’anno 2014, sfruttando un metodo di classificazione elaborato in letteratura e pubblicato da Beck (2000). Questo metodo con alcune modificazioni effettuate per tenere conto delle specificità locali ha permesso di definire 13 tipi di tempo (Fig. 40) e di classificare in accordo a tale schema la frequenza e la ricorrenza dei tipi di tempo sul dominio del Trentino (Fig. 41). Una volta effettuata la classificazione, si sono analizzate di conseguenza le osservazioni di temperatura, pioggia, radiazione e vento raccolte presso le stazioni locali nel periodo 1992-2013. In particolare, radiazione e vento derivano dai dati raccolti ed analizzati per l’Atlante Solare e quello Eolico. Questa attività ha permesso di identificare il tempo che si verifica a scala regionale in associazione a ciascuno dei 13 tipi di tempo individuati (Fig. 42).

I risultati di questo modulo di lavoro sono stati presentati nel corso delle seguenti conferenze:

- European Geophysical Union General Assembly 2014 (Vienna, Austria, aprile 2014);
- 16th AMS Conference on Mountain Meteorology (San Diego, California, agosto 2014);
- 33rd International Conference on Alpine Meteorology (Innsbruck, Austria, settembre 2015).

Inoltre sono stati pubblicati due articoli (un terzo è in scrittura) su rivista scientifica, che si basano sulle analisi e sui risultati ottenuti nell’ambito di questo progetto:

- Panziera, L., Giovannini, L., Laiti, L., Zardi, D., 2015: The relation between circulation types and regional Alpine climate. Part I: synoptic climatology of Trentino. Int. J. Climatol., doi: 10.1002/joc.4314.
- Panziera, L., Giovannini, L., Laiti, L., Zardi, D., 2015: The relation between circulation types and regional Alpine climate. Part II: the dependence of the predictive skill on the vertical level of the classification for Trentino. Int. J. Climatol., doi: 10.1002/joc.4487.

Per questo progetto non sono state elaborate mappe specifiche che possano essere pubblicate sul sito dell'Atlante Climatico. Diversamente si è deciso di attivare solo alcune pagine web dedicate (Fig. 40) che illustrino gli aspetti principali del progetto e portino un paio di esempi significativi di facile spiegazione. Sono stati perciò preparati i testi che sono stati trasmessi alla Fondazione B. Kessler e pubblicati sul sito. In particolare si è provveduto a introdurre il concetto di “tipi di tempo” e la classificazione adottata e a spiegare il significato delle analisi statistiche effettuate sulle osservazioni meteorologiche locali. Inoltre si provvederà a linkare la Relazione finale del progetto e i due articoli in rivista scientifica tratti da questo lavoro, per renderli facilmente accessibili a chi fosse interessato ad approfondire il tema.

Di seguito si riportano i testi proposti.

Pagina 1: La circolazione sinottica e i tipi di tempo

“Con il termine circolazione sinottica ci si riferisce ai movimenti delle masse atmosferiche su grande scala, cioè dell'ordine del migliaio di chilometri. La circolazione sinottica viene comunemente classificata in un certo numero di classi, che sono dette tipi di tempo (weather types). Questa denominazione enfatizza il fatto che diversi tipi di circolazione sinottica determinano diversi tipi di tempo meteorologico in una regione sufficientemente piccola come il Trentino. Per classificare le diverse tipologie di circolazione sinottica è stata analizzata la distribuzione spaziale della pressione atmosferica sull'Europa a diverse altitudini, in modo da ottenere delle classi strettamente correlate con la direzione del vento in quota (il cosiddetto vento geostrofico). In particolare, il metodo di classificazione utilizzato (proposto da Beck et al. 2000) produce 10 classi corrispondenti a venti che soffiano da N, NE, E, SE, S, SW, W e NW, oltre a due classi che rappresentano condizioni di alta e bassa pressione. In questa applicazione la classe di bassa pressione è stata ulteriormente divisa in 4 sotto-classi, in base alla posizione del minimo di pressione rispetto al Trentino. Le figure sottostanti (Fig.

41 e 42) mostrano i 13 tipi di tempo relativi all'altezza geopotenziale di 500 hPa (corrispondente a circa 5500 m s.l.m.) e le frequenze con le quali si sono verificati i suddetti tipi di tempo alle diverse quote nel periodo 1992-2013. Non passa inosservata la predominanza alle alte quote delle classi di circolazione sinottica proveniente dai settori occidentali, mentre alle quote più basse si nota una maggiore variabilità.

Per ulteriori dettagli scarica la Relazione finale (link alla relazione in pdf) dell'Analisi delle situazioni sinottiche."

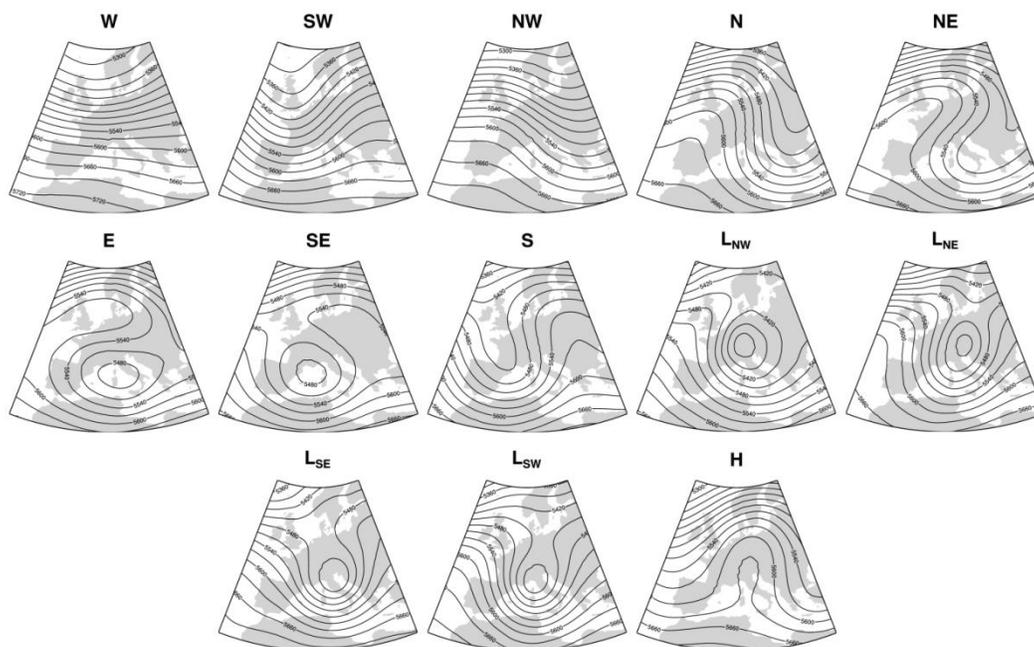


Figura 40. I diversi tipi di tempo corrispondenti alla classificazione sinottica adottata.

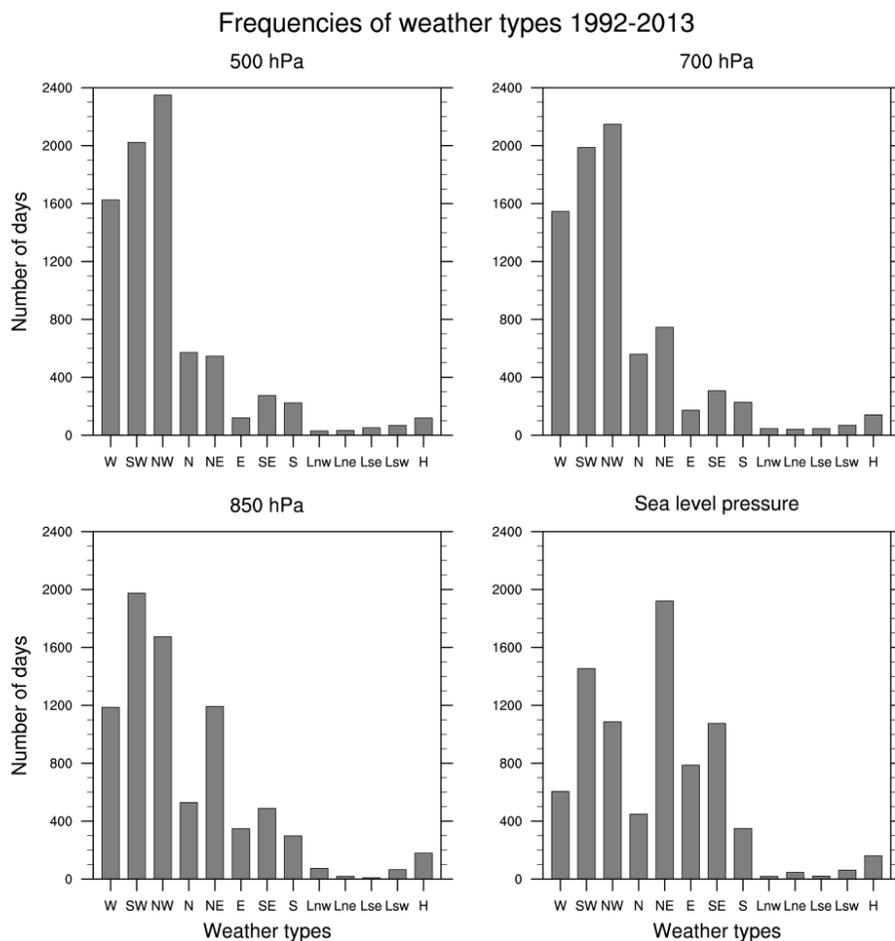


Figura 41. Le frequenze (number of days) dei diversi tipi (weather types) di tempo a 500 hPa (circa 5500 m s.l.m.), 700 hPa (circa 3000 m s.l.m.), 850 hPa (circa 1500 m s.l.m.) e a livello del mare (“sea level pressure”) nel periodo 1992-2013.

Pagina 2: Il tempo e il clima in Trentino

“Il tempo e il clima in Trentino sono descritti in questo studio utilizzando dati giornalieri di temperatura, pioggia, radiazione solare e vento; in particolare, sono state selezionate le stazioni meteorologiche con un archivio sufficientemente esteso nel tempo per effettuare un’analisi statistica, dislocate sul territorio provinciale a diverse altitudini. I dati di radiazione solare e di vento sono quelli utilizzati anche nell’ambito dell’atlante della radiazione e dell’atlante eolico.

Mediante l’utilizzo di particolari rappresentazioni grafiche, è stato possibile descrivere la relazione tra i diversi tipi di tempo e i dati misurati presso tutte le stazioni. Ad esempio, la figura sottostante (Fig. 42) mostra le anomalie standardizzate (cioè il discostamento dal valor medio) di temperatura, precipitazione, radiazione solare e intensità del vento osservate in corrispondenza dei diversi tipi di tempo, alle diverse quote e nelle diverse stagioni. I tipi di tempo

che implicano correnti meridionali sul Trentino appaiono chiaramente associati a precipitazioni giornaliere più intense della media, ma anche a temperature più elevate delle medie stagionali. Con tipi di tempo che causano venti dai quadranti settentrionali, invece, le anomalie di radiazione solare e vento sono fortemente positive, mentre quelle di precipitazione negative. Infine, il verificarsi dello stesso tipo di tempo alle diverse quote può causare talvolta condizioni meteorologiche molto diverse sul Trentino.

Nell'appendice alla relazione finale si trovano tabelle analoghe dedicate alle singole stazioni, che descrivono più nel dettaglio la relazione tra i tipi di tempo e le condizioni meteorologiche locali. Per ulteriori dettagli scarica la Relazione finale dell'Analisi delle situazioni sinottiche."

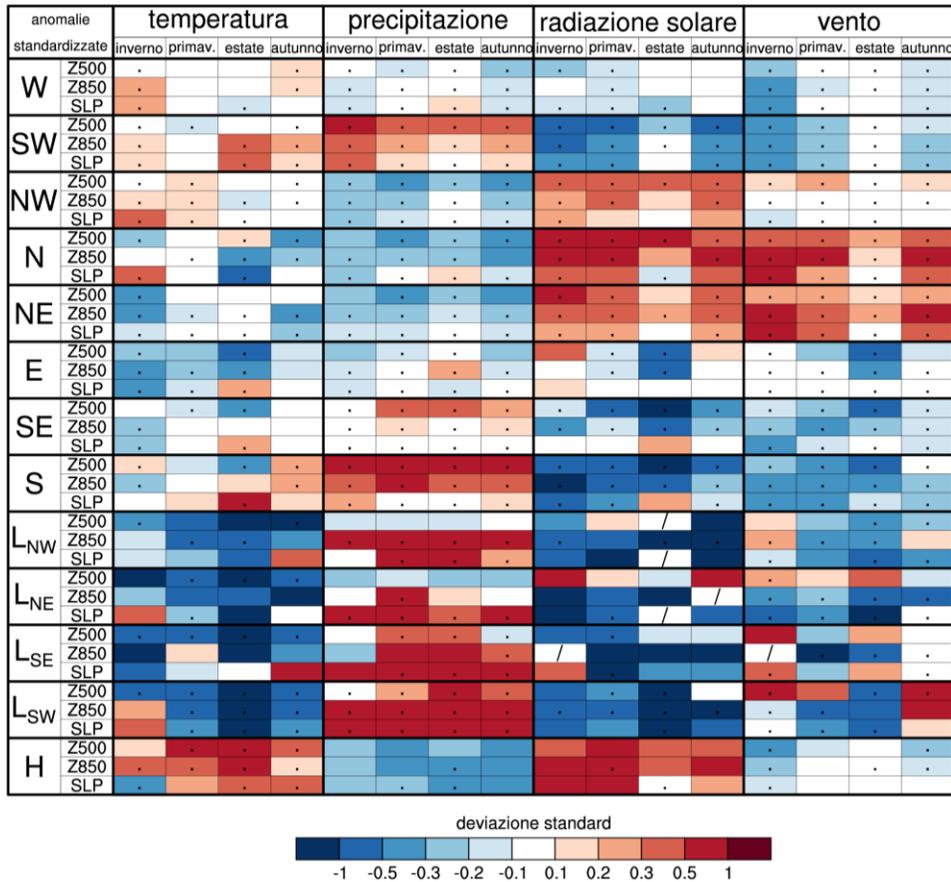


Figura 42. Anomalie standardizzate di temperatura, precipitazione, radiazione solare e intensità del vento osservate in corrispondenza dei diversi tipi di tempo, alle diverse quote e nelle diverse stagioni.

Pagina 3: Prevedere il tempo con le classificazioni sinottiche

“Nell’ultima parte di questo studio è stata analizzata la capacità predittiva del sistema di classificazione sinottica elaborato per il territorio del Trentino, ossia la sua capacità di classificare la circolazione atmosferica a larga scala in tipi di tempo i cui valori meteorologici tipici si discostano da quelli climatologici stagionali. È stato generalmente riscontrato che questo accade per tutte le grandezze analizzate e per tutti i livelli verticali a cui è stato applicato il metodo di classificazione. I risultati di questo studio sono stati pubblicati in due articoli scientifici recentemente pubblicati su riviste specialistiche:

- *Panziera, L., Giovannini, L., Laiti, L., Zardi, D. (2015): The relation between circulation types and regional Alpine climate. Part I: synoptic climatology of Trentino. Int. J. Climatol., doi: 10.1002/joc.4314.
(<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.4314/abstract>)*
- *Panziera, L., Giovannini, L., Laiti, L., Zardi, D. (2015): The relation between circulation types and regional Alpine climate. Part II: the dependence of the predictive skill on the vertical level of the classification for Trentino. Int. J. Climatol., doi: 10.1002/joc.4487.
(<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.4487/abstract>)*

Per ulteriori dettagli scarica la Relazione finale dell’Analisi delle situazioni sinottiche.”

6 Conclusioni

I precedenti capitoli hanno descritto le attività svolte per il progetto “Messa a punto di applicativi condivisi specifici per la spazializzazione e la mappatura delle principali variabili meteo-climatologiche sul territorio del Trentino”, finalizzato al perfezionamento e alla pubblicazione dei risultati ottenuti nell’ambito dell’Atlante Climatico del Trentino sul sito web climatlas.fbk.eu. Lo scopo del progetto è quello di definire in maniera condivisa le procedure di interpolazione più appropriate per la spazializzazione delle principali variabili meteo-climatologiche sul territorio del Trentino, in vista del contestuale completamento e aggiornamento dell’interfaccia web.

Le attività di messa a punto delle tecniche di spazializzazione si sono principalmente concentrate sulle climatologie di precipitazione media mensile, stagionale e annua per i trentenni di riferimento 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 (Capitolo 4). Infatti, questa è la variabile meteo-climatologica che era caratterizzata dalla tecnica di interpolazione meno raffinata e meno adeguata, tra quelle prese in esame nel progetto. Data la scarsità di stazioni di osservazione, ma soprattutto data la complessità della topografia locale e quindi della distribuzione spaziale di precipitazione, l’applicazione di un algoritmo di ordinary kriging forniva mappe inadeguate, caratterizzate da un campo molto poco variabile e poco legato alla morfologia del territorio. Lo sviluppo di un algoritmo di kriging residuale o kriging con drift esterno specifico per questa applicazione, che tiene debitamente conto del trend globale spaziale di precipitazione, ha permesso di migliorare molto la qualità delle mappe, fatto testimoniato anche dall’associata riduzione in media degli errori di validazione incrociata. L’introduzione delle informazioni ausiliarie relative a quota, longitudine e latitudine si è rivelata preziosa per il miglioramento dei risultati dell’algoritmo di mappatura, in accordo a quanto evidenziato dalla letteratura scientifica pertinente (Capitolo 2) e dallo stato dell’arte delle attività di mappatura di variabili meteo-climatologiche presso i servizi meteorologici regionali italiani (sezione 4.4). Sono state portate avanti in maniera indipendente anche ulteriori analisi statistiche esplorative delle potenzialità degli algoritmi selezionati (ma anche di quelli poi scartati), non strettamente legate alla climatologia

in esame nell'ambito del progetto Atlante Climatico, quanto piuttosto ad altri progetti ed esplorazioni collegati con un focus sulla regione in esame, oppure a possibili applicazioni e sviluppi delle attività di interpolazione spaziale.

Infine, le attività di pubblicazione dei risultati sul sito web, anche in termini didattici ed educativi, hanno rappresentato l'altro nucleo importante del lavoro. Sono state predisposte alcune pagine web dedicate a scopo didattico per l'Atlante Solare, l'Atlante Eolico e l'Analisi delle situazioni sinottiche. In queste pagine sono state citate tutte le fonti di informazione ausiliarie (relazioni finali, articoli scientifici, siti web, ...) che possono essere consultate dagli utenti. Oltre alle immagini delle mappe di radiazione solare e della risorsa eolica disponibili per il download sul sito web dell'Atlante Climatico, si è provveduto alla pubblicazione delle stesse mappe georeferenziate sul portale OpenData Trentino, allo scopo di agevolare la fruizione soprattutto da parte di potenziali utenti professionali e scientifici. Questo appare particolarmente significativo per i due moduli di lavoro più strettamente legati alle attività di valutazione del potenziale delle energie rinnovabili sul territorio della regione Trentino. Per la stessa ragione sono state tenute nell'ultimo anno parecchie presentazioni dei risultati dei due Atlanti, Solare e Eolico, in occasioni di conferenze scientifiche nazionali e internazionali, ma anche di seminari universitari e incontri pubblici.

Per concludere, si comunica che è intenzione degli autori approfondire particolari aspetti collegati alle attività svolte finora, ad esempio appare particolarmente interessante in prospettiva effettuare un confronto su base giornaliera e mensile tra la precipitazione stimata dal radar meteorologico di Monte Macaion e quella interpolata a partire dalle stazioni al suolo per l'anno 2014. A tale scopo sono già stati raccolti i dati radar in questione, e si è provveduto a testare la performance della tecnica di interpolazione prescelta per i totali mensili dell'anno 2014 misurati presso le 109 stazioni in attività. Inoltre nelle intenzioni degli autori c'è la pubblicazione di uno o più articoli scientifici di presentazione alla comunità internazionale, ma anche ai professionisti locali potenzialmente interessati, della risorsa rappresentata dall'Atlante Climatico del Trentino.

Ringraziamenti

Si ringraziano per la loro preziosa collaborazione e indispensabili contributi alla realizzazione di questo progetto le seguenti persone:

- dott. Roberto Barbiero, dott. Elvio Panettieri, dott. Paolo Cestari di Meteotrentino;
- dott. Cesare Furlanello, dott. Claudia Dolci, dott. Andrea Nardelli, dott. Michele Filosi della Fondazione B. Kessler;
- dott. Emanuele Eccel, ing. Daniele Andreis, ing. Fabio Zottele, dott. Giambattista Toller della Fondazione E. Mach.

Bibliografia

- Ahmed S., de Marsily G., 1987: Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resour. Res.*, 23, 1717-1737.
- Attorre F., Alfò M., De Sanctis M., Francesconi F., Bruno F., 2007: Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale. *International Journal of Climatology*, 27, 1825-1843.
- Beck C., 2000: Zirkulationsdynamische Variabilität im Bereich Nordatlantik-Europa seit 1780, Vol. 95, Würzburger Geographische Arbeiten.
- Brunetti M., Lentini G., Maugeri M., Nanni T., Simolo C., Spinoni J., 2009: 1961-1990 high-resolution Northern and Central Italy monthly precipitation climatologies. *Advances in Science and Research*, 3, 73-78.
- Brunetti M., Lentini G., Maugeri M., Nanni T., Simolo C., Spinoni J., 2012: Projecting North Eastern Italy temperature and precipitation secular records onto a high-resolution grid. *Physics and Chemistry of the Earth*, 40-41, 9-22.
- Brunetti M., Maugeri M., Nanni T., Simolo C., Spinoni J., 2014: High-resolution temperature climatology for Italy: interpolation method intercomparison. *International Journal of Climatology*, 34, 1278-1296.
- Cressie N.A.C., 1991: *Statistics for spatial data*. New York, John Wiley & Sons, 920 pp.
- Creutin J.D., Obled C., 1982: Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Water Resources Research*, 18, 413-431.
- Daly C., 2006. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International Journal of Climatology*, 26, 707-721.
- Daly C., Gibson W.P., Taylor G.H., Johnson G.L., Pasteris P., 2002: A knowledge based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research*, 22, 99-113.
- Daly C., Halbleib M., Smith J.I., Gibson W.P., Doggett M.K., Taylor G.H., Curtis J., Pasteris P.A., 2008: Physiographically-sensitive mapping of temperature and precipitation across the conterminous United States. *International Journal of Climatology*, 28, 2031-2064.

- Daly C., Neilson R.P., Phillips D.L., 1994: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over Mountainous Terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 140-158.
- Daly C., Taylor G.H., Gibson W.P., Parzybok T.W., Johnson G.L., Pasteris P., 2001: High-quality spatial climate data sets for the United States and beyond. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 43, 1957-1962.
- Delaunay B., 1934: Sur la sphère vide. A la mémoire de Georges Voronoï, *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS, Classe des sciences mathématiques et naturelles*, 6, 793-800.
- Di Piazza A., Lo Conti F., Noto L.V., Viola F., La Loggia G., 2011: Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 396-408.
- Dobesch H., Dumolard P., Dyras I., 2007: Spatial Interpolation for Climate Data. *The Use of GIS in Climatology and Meteorology*. Dobesch, H., Dumolard, P., Dyras I. (Ed.), 282 pp.
- Efthymiadis D., Jones P.D., Briffa K.R., Auer I., Böhm R., Schöner W., Frei C., Schmidli J., 2006: Construction of a 10-min-gridded precipitation data set for the Greater Alpine Region for 1800-2003. *Journal of Geophysical Research*, 111, D01105.
- Frei C., 2014: Interpolation of temperature in a mountainous region using nonlinear profiles and non-Euclidean distances. *International Journal of Climatology*, 34, 1585-1605.
- Frei C., Schär C., 1998: A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology*, 18, 873-900.
- Giovannini L., Antonacci G., Zardi D., Laiti L., Panziera L., 2014: Sensitivity of simulated wind speed to spatial resolution over complex terrain. *Energy Procedia* 59, 323-329.
- Hiebl J., Auer I., Böhm R., Schöner W., Maugeri M., Lentini G., Spinoni J., Brunetti M., Nanni T., Perçec Tadić M., Bihari Z., Dolinar M., Müller-Westermeier G., 2009: High-resolution 1961-1990 monthly temperature climatology for the greater Alpine region. *Meteorologische Zeitschrift*, 18, 507-530.

- Hiebl J., Frei C., 2015: Daily temperature grids for Austria since 1961 – concept, creation and applicability. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-18.
- Hiebl J., Reisenhofer S., Auer I., Böhm R., Schöner W., 2011: Multi-methodical realisation of Austrian climate maps for 1971-2000. *Advances in Science and Research*, 6, 19-26.
- Hudson G., Wackernagel H., 1994: Mapping temperature using kriging with external drift: theory and an example from Scotland. *International Journal of Climatology*, 14, 77-91.
- Hutchinson M.F., 1995: Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9, 385-403.
- Hutchinson M.F., 1998a: Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines. Part I: two dimensional smoothing of data with short range correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2, 139-151.
- Hutchinson M.F., 1998b: Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines. Part II: analysis of topographic dependence. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2, 152-167.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989: *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, 561 pp.
- Journée M., Delvaux C., Bertrand C., 2015: Precipitation climate maps of Belgium. *Adv. Sci. Res.*, 12, 73-78.
- Journel A., Huijbregts C., 1978: *Mining Geostatistics*. Academic Press, San Diego, California (USA).
- Krige D.G., 1951: A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. of Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa*, 52, 119-139.
- Laiti L., Andreis D., Zottele F., Giovannini L., Panziera L., Toller G., Zardi D., 2014a: A solar atlas for the Trentino region in the Alps: quality control of surface radiation data. *Energy Procedia*, 59, 336-343.
- Laiti L., Giovannini L., Zardi D., 2014b: *Analisi di dati di radiazione solare al suolo e messa a punto di un modello di trasferimento radiativo in atmosfera per la mappatura della radiazione solare sul territorio della Provincia di Trento - Relazione finale*. 104 pp.

- Melgani F., Bruzzone L., 2004: Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 1778-1790.
- Ninyerola M., Pons X., Rourea J. M., 2000: A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, 20, 1823-1841.
- Panziera, L., Giovannini, L., Laiti, L., Zardi, D., 2015: The relation between circulation types and regional Alpine climate. Part I: synoptic climatology of Trentino. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.4314.
- Panziera, L., Giovannini, L., Laiti, L., Zardi, D., 2015: The relation between circulation types and regional Alpine climate. Part II: the dependence of the predictive skill on the vertical level of the classification for Trentino. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.4487.
- Pardo-Igúsquiza E., 1998: Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography. *Int. J. Climatol.*, 18, 1031-1047.
- Philips D.L., Dolphy J., Marks D., 1992: A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 119-141.
- Prudhomme, C., Reed, D.W., 1998: Relationships between extreme daily precipitation and topography in a mountainous region: a case study in Scotland. *Int. J. Climatol.*, 18, 1439-1453.
- Schwarb M., 2001: The Alpine precipitation climate. Evaluation of a high-resolution analysis scheme using comprehensive rain-gauge data. PhD thesis No. 13911, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich.
- Schwarb M., Frei C., Daly C., Schär C., 2001: Mean seasonal precipitation throughout the European Alps 1971-1990. In: Spreafico M., Weingartner R., Leibundgut C. (Ed.): *Hydrological atlas of Switzerland. Landeshydrologie und geologie*, Bern, Plate 27.
- Shepard D., 1968: A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 ACM National Conference*, 517-524.
- Sideris I.V., Gabella M., Erdin R., Germann U., 2014: Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140, 1097-1111.

- Sluiter R., 2009: Interpolation methods for climate data literature review. KNMI intern rapport IR 2009-04, De Bilt, Paesi Bassi.
- Spinoni J., 2010: 1961–1990 High-Resolution Temperature, Precipitation, and Solar Radiation Climatologies for Italy. Università degli Studi di Milano, tesi di dottorato.
- Stoeckli R., 2013: The HelioMont Surface Solar Radiation Processing. Scientific Report MeteoSwiss, 93, 122 pp.
- Tabios, G.Q., Salas, J.D., 1985: A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Journal of the American Water Resources Association*, 21, 365–380.
- Tait A., Henderson R., Turner R., Zheng X., 2006: Thin plate smoothing spline interpolation of daily rainfall for New Zealand using a climatological rainfall surface. *International Journal of Climatology*, 26, 2097-2115.
- Thiessen A.H., 1911: Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, 39, 1082-1084.
- Tveito O.E., Wegehenkel M., van der Wel F., Dobesch H., 2006: COST Action 719 - ESSEM. The use of geographic information systems in Climatology and Meteorology.
- Uboldi F., Lussana C., Salvati M., 2008: Three-dimensional spatial interpolation of surface meteorological observations from high-resolution local networks. *Meteorological Applications*, 15, 331-345.
- Voronoi G., 1907: Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, 133, 97-178.

Indice delle figure

Figura 1. Rappresentazione dell'orografia del territorio della Provincia di Trento. I valori di elevazione del terreno sono espressi in m s.l.m. (vedi legenda).	3
Figura 2. Mappa delle stazioni che compongono la rete osservativa meteoroclimatologica gestita da Meteotrentino (fonte: www.meteotrentino.it/dati-meteo/stazioni/mappe/gmapstz.aspx?ID=205).	6
Figura 3. Mappa delle stazioni che compongono la rete osservativa meteoroclimatologica gestita dalla Fondazione Edmund Mach (valori cumulati di pioggia in mm per l'anno 2015 al 12/11/2015; fonte: meteo.fmach.it/meteo/mappa.php).	6
Figura 4. L'attuale home page dell'interfaccia web dell'Atlante Climatico del Trentino (climatlas.fbk.eu).	10
Figura 5. Distribuzione con la quota del terreno delle osservazioni di temperatura giornaliera media stagionale per il trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico. DGF indica l'inverno meteorologico (mesi di dicembre, gennaio e febbraio), MAM la primavera (marzo, aprile, maggio), GLA l'estate (giugno, luglio agosto) e SON l'autunno (settembre, ottobre, novembre).	23
Figura 6. Distribuzione con la quota del terreno delle osservazioni di temperatura giornaliera media mensile per l'inverno (gennaio, febbraio, dicembre) del trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico.....	24
Figura 7. Distribuzione delle stazioni di misura considerate per l'Atlante Climatico del Trentino (sono comprese tutte le stazioni, non solo quelle che misurano la temperatura).	25
Figura 8. Figura tratta da Ubaldi et al. (2008) che mostra le osservazioni di temperatura (in rosso) e il campo di background (in azzurro), ottenuto tramite de-trending delle osservazioni stesse. Sono riportati due casi esemplificativi per la regione Lombardia: (a) caso di nebbia persistente, 20 gennaio 2006, ore 12:00; (b) caso di foehn da nord e neve in quota: 12 marzo 2006, ore 05:00.....	28

Figura 9. Mappa di temperatura media giornaliera (°C) per il mese di gennaio per il trentennio di riferimento 1961-1990, così come presentata sul sito web dell'Atlante Climatico del Trentino.....	29
Figura 10. Mappa di temperatura media giornaliera (°C) per il mese di aprile per il trentennio di riferimento 1981-2010, così come presentata sul sito web dell'Atlante Climatico del Trentino.....	29
Figura 11. Differenza tra il numero di giorni estivi con Tmax > 25°C relativi al trentennio 1981-2010 e quelli del trentennio di riferimento 1961-1990 (in giorni). È evidente il fronte di maggior intensità del cambiamento della variabile considerata, legato al riscaldamento climatico in atto. Tale zona si attesta comprensibilmente intorno alla quota di 1500 m s.l.m., dove il numero di giorni estivi con Tmax > 25°C tipicamente si annulla. L'incremento è molto meno marcato alle quote inferiori. Immagine gentilmente fornita dal Dr. Rocco Scolozzi.	31
Figura 12. Distribuzione con la quota del terreno delle osservazioni di precipitazione cumulata media stagionale per il trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico. DGF indica l'inverno, MAM la primavera, GLA l'estate e SON l'autunno (stagioni meteorologiche). .	34
Figura 13. Distribuzione con la latitudine delle osservazioni di precipitazione cumulata media stagionale per il trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico (vedi Fig. 12; stagioni meteorologiche).....	35
Figura 14. Distribuzione con la longitudine delle osservazioni di precipitazione cumulata media stagionale per il trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico (vedi Fig. 12; stagioni meteorologiche).....	35
Figura 15. Mappa di precipitazione giornaliera sulla Provincia di Trento del 13 settembre 2015, pubblicata sul sito web di Meteotrentino.	39
Figura 16. Mappa di precipitazione giornaliera sulla Provincia di Bolzano del 14 maggio 2014.....	39
Figura 17. Mappa di precipitazione cumulata per l'anno 2012 sul territorio della Regione Veneto (fonte: www.arpa.veneto.it).....	40
Figura 18. Mappa delle precipitazioni medie annue per il periodo 1961-2013 per il territorio della Regione Friuli Venezia-Giulia (www.meteo.fvg.it/clima.php?ln=&m=0).....	41

Figura 19. Mappa delle precipitazioni medie mensili di luglio per il trentennio 1961-1990 per il territorio della Regione Lombardia (ita.arpalombardia.it/ita/meteo/foralps_climatologia.asp).....	41
Figura 20. Mappa della precipitazione media annua 1991-2006 per il territorio della Regione Emilia Romagna (www.arpa.emr.it/cms3/documenti/_cerca_doc/meteo/clima/prec91-06.png).....	42
Figura 21. Rappresentazione schematica di un modello teorico di semivariogramma, con l'indicazione dei diversi parametri che ne identificano la struttura.....	45
Figura 22. Errori di validazione incrociata percentuali per le singole stazioni calcolati sulle stime di precipitazione media stagionale (trentennio 1981-2010) in relazione ai risultati dell'interpolazione tramite residual kriging con trend lineare rispetto a longitudine, latitudine e quota. Primo gruppo di stazioni pluviometriche.....	49
Figura 23. Come Fig. 22, ma per il secondo gruppo di stazioni pluviometriche.....	49
Figura 24. Mappa della precipitazione media di gennaio (1981-2010) pubblicata sul sito web dell'Atlante Climatico.....	50
Figura 25. Mappa della precipitazione media di gennaio (1981-2010) in mm, ottenuta con il metodo ordinary kriging (del tutto corrispondente a Fig. 22).....	51
Figura 26. Come in Fig. 23, ma per il metodo residual kriging che adotta un trend lineare solo con la quota del terreno (mm di precipitazione). 51	51
Figura 27. Come in Fig. 23, ma per il metodo residual kriging che adotta un trend lineare con le coordinate geografiche e la quota del terreno (mm di precipitazione).	52
Figura 28. Come in Fig. 24, ma per il mese di giugno.	52
Figura 29. Come in Fig. 25, ma per il mese di giugno.	53
Figura 30. Come in Fig. 26, ma per il mese di giugno.	53
Figura 31. Come in Fig. 27, ma per il mese di giugno.	54
Figura 32. Screenshot della home page del sito web dell'Atlante Climatico. È possibile notare in basso a sinistra il riquadro che rimanda alle pagine dedicate all'Atlante Solare, assieme alla voce con menu a tendina all'estrema destra nella barra grigia in alto.	58
Figura 33. Screenshot della prima pagina web dedicata all'Atlante Solare.	59

Figura 34. Screenshot della seconda pagina web dedicata all'Atlante Solare.....	59
Figura 35. Screenshot della terza pagina web dedicata all'Atlante Solare.	60
Figura 36. Screenshot della quarta pagina web dedicata all'Atlante Solare.	60
Figura 37. Un esempio di screenshot dal sito web dell'Atlante Climatico che mostra la visualizzazione offerta per le mappe dell'Atlante Solare del Trentino (nello specifico per il mese di dicembre).....	61
Figura 38. Screenshot della voce "Anagrafica stazioni climatiche", dove è possibile riconoscere le nuove voci contrassegnate dal simbolo del sole corrispondenti alle stazioni radiometriche.....	62
Figura 39. Ipotesi di localizzazione dei riquadri che rimandano alle pagine dedicate all'Atlante Eolico e all'Analisi delle situazioni sinottiche sulla nuova home page dell'Atlante Climatico.	64
Figura 40. I diversi tipi di tempo corrispondenti alla classificazione sinottica adottata.	69
Figura 41. Le frequenze (number of days) dei diversi tipi (weather types) di tempo a 500 hPa (circa 5500 m s.l.m.), 700 hPa (circa 3000 m s.l.m.), 850 hPa (circa 1500 m s.l.m.) e a livello del mare ("sea level pressure") nel periodo 1992-2013.	70
Figura 42. Anomalie standardizzate di temperatura, precipitazione, radiazione solare e intensità del vento osservate in corrispondenza dei diversi tipi di tempo, alle diverse quote e nelle diverse stagioni.	71

Appendice

Script definitivo in linguaggio R

Si riporta di seguito lo script definitivo elaborato per l'applicazione dell'algoritmo di KED (Kriging von Drift Esterno) che è stato fornito al personale della Fondazione B. Kessler per l'integrazione sistematica nel sito web dell'Atlante Climatico.

```
#-----  
# ATLANTE DEL CLIMA TRENINO  
# MAPPATURA GEOSTATISTICA DELLE CLIMATOLOGIE DI PRECIPITAZIONE  
# TOTALI MENSILI E STAGIONALI MEDI SU TRENTENNIO  
# METODO: KRIGING WITH EXTERNAL DRIFT CON VARIABILI AUSILIARIE  
LONGITUDINE, LATITUDINE E QUOTA  
# CHE COINCIDE CON RESIDUAL KRIGING CON DRIFT LINEARE RISPETTO  
ALLE STESSE VARIABILI  
# AUSILIARIE (y = a*lon+b*lat+c*z+d)  
#  
# 26/10/2015  
#-----  
# DICHIARO DIRECTORY DI LAVORO  
setwd("F:/SPAZIALIZZAZIONE - ATLANTE CLIMA TRENINO/script definitivo per FBK")  
  
# PACKAGES AND LIBRARIES  
library(moments)  
library(labstatR)  
library(gstat)  
# sp  
#-----  
# LETTURA DATI DI INPUT (CLIMATOLOGIE TRENTENNALI)  
#  
station_name,x,y,z,gen,feb,mar,apr,mag,giu,lug,ago,sett,ott,nov,dic,DGF,MAM,GLA,SON  
dati <- read.table("Precipitazione_cumulata_1971_2000.csv", header = TRUE, sep = ",")  
df1 = dati  
tmp = dim(df1)  
n_staz = tmp[1]  
n_vars = tmp[2] - 4
```

```

#-----
# CREO LA GRIGLIA DI INTERPOLAZIONE (spacing = 200 m)
# IMPORTANTE: NOMI COLONNE LON. E LAT. GRIGLIA = NOMI CORRISPONDENTI
FILE STAZIONI
grd <- expand.grid(x=seq(from=607500, to=733500, by=200), y=seq(from=5054700,
to=5161900, by=200) )
# ASSOCIO MODELLO DIGITALE DEL TERRENO
terreno <- read.table("terreno.asc", header = FALSE)
tmp = dim(terreno)
ctmp = matrix(nrow=tmp[1]*tmp[2],ncol=1)
for (i in 1:tmp[1]) {
  for (j in 1:tmp[2]) {
    ctmp[(i-1)*tmp[2]+(j-1)+1] = terreno[tmp[1]-(i-1),j]*1.
  }
}
grd <- cbind(grd,ctmp)
# RINOMINO COLONNA DELLE QUOTE DEL TERRENO = COLONNA QUOTE DELLE
STAZIONI (IMPORTANTE)
colnames(grd)[3] <- "z"
coordinates(grd) <- ~ x+y
gridded(grd) <- TRUE
#-----
# CALCOLO TREND LINEARI E RESIDUI PER STIMA VARIOGRAMMI DI DEFAULT
res_xyz = matrix(nrow=n_vars,ncol=n_staz)
for (i in 1:n_vars) {
  # trend lineare con x, y e z ( $y = a*lon+b*lat+c*z+d$ )
  lm.xyz = lm(df1[,i+4] ~ df1$x + df1$y + df1$z)
  res_xyz[i,] <- resid(lm.xyz)
}
#-----
# TRASFORMO DATAFRAME IN EXPLICIT SPATIAL OBJECT
coordinates(df1)<--x+y
#-----
# STIMA E FITTING DEI VARIOGRAMMI + APPLICAZIONE KRIGING
# variogrammi sono isotropi perchè ho poche stazioni
# modello di variogramma: sferico + nugget

# NOMI MESI/STAGIONI
tp_name <-
c("gen","feb","mar","apr","mag","giu","lug","ago","set","ott","nov","dic","DGF","MAM","GLA",
,"SON")

library(lattice)
trellis.par.set(sp.theme())

# CICLO PRINCIPALE
for (k in 1:n_vars) {

  # ASSEGNO MESE/STAGIONE
  obs <- df1[[tp_name[k]]]

```

```

# CALCOLO VARIOGRAMMA SPERIMENTALE
v.xyz.exp = variogram(obs ~ x + y + z, locations = df1, cutoff = 35000, width = 3500,
alpha = 0, tol.hor = 90)

# FIT DEL VARIOGRAMMA TEORICO (MODELLO)
v.xyz.fit = fit.variogram(v.xyz.exp, model = vgm(0,"Sph",17500,var(res_xyz[k,])))

# ASSEGNO VARIOGRAMMA DI DEFAULT
# soluzione di backup per i casi di fallimento della procedura automatica o
# "bad fit" (dovuto a pochi dati/natura della variabile/etc.)
if ( ( attr(v.xyz.fit, "singular") == TRUE) | (max(v.xyz.fit$range) > 30000)|
(v.xyz.fit[1,2]>v.xyz.fit[2,2]) ) {
  v.xyz.fit <- vgm(mean(v.xyz.exp$gamma[6:10]),"Sph",20000)
}

# CROSSVALIDATION
# kcv.xyz <- krige.cv(obs ~ x + y + z, locations = df1, model = v.xyz.fit)

# KED
kri.xyz <- krige(obs ~ x + y + z, locations = df1, newdata = grd, model = v.xyz.fit, nmax =
n_staz-1)
#-----
# STAMPA DEI RISULTATI SU FILE PDF
pdf(paste("Risultati",tp_name[k],".pdf"))
# plot stime
min_val <- min(kri.xyz$var1.pred,na.rm = TRUE)
max_val <- max(kri.xyz$var1.pred,na.rm = TRUE)
ramp = seq(from=min_val, to=max_val, by=(max_val-min_val)/15.)
print(spplot(kri.xyz["var1.pred"],asp=1,main="KED estimates
(mm)",col.regions=heat.colors,at=ramp,xlab="X [m E]",ylab="Y [m N]"))
# plot varianza delle stime
min_val <- min(kri.xyz$var1.var,na.rm = TRUE)
max_val <- max(kri.xyz$var1.var,na.rm = TRUE)
ramp = seq(from=(min_val), to=(max_val), by=(max_val-min_val)/15.)
print(spplot((kri.xyz["var1.var"]),asp=1,main="KED variance (mm^2)",at=ramp,xlab="X
[m E]",ylab="Y [m N]"))
dev.off()

# rm(v.xyz.exp,v.xyz.fit,kcv.xyz,kri.xyz)
rm(v.xyz.exp,v.xyz.fit,kri.xyz)

}

```

