Quaderno di **METEOROLOGIA APERTA** N°2

DELLA RIANALISI, O ANALISI RETROSPETTIVA, IN METEOROLOGIA

Massimo Crespi[1]
Gianluca Ferrari[2]

In Padova (Italia),
Autunno 2020

Sommario

1. INTRODUZIONE 3

1.1. OBIETTIVI 3

1.2. BREVE CONTESTUALIZZAZIONE CULTURALE DELLA LETTURA DEI FENOMENI ATMOSFERICI IN EPOCA CONTEMPORANEA 4

1.3. LO SCENARIO NAZIONALE 8

1.4. LO SCENARIO INTERNAZIONALE ED EUROPEO 8

2. LA RIANALISI (O ANALISI RETROSPETTIVA) METEOROLOGICA 10

2.1. ORIGINE E PROSPETTIVE 10

2.2. DEFINIZIONE 10

2.3. CARATTERISTICHE SALIENTI 11

2.4. METODO 12

2.4.1. Le osservazioni 13

2.4.2. Il modello di previsione atmosferica e il sistema di assimilazione dati 14

2.4.3. Il *post-processing* 15

2.5. I VANTAGGI 16

2.6. I PRINCIPALI *DATASET* DI RIANALISI 17

2.6.1. Rianalisi globali 17

2.6.2. Rianalisi regionali 19

3. LA PSEUDO RIANALISI: CLASSIFICAZIONE EMPIRICA DEI *DATASET* 21

3.1. *DATASET* DA OSSERVAZIONI *IN SITU* 21

3.1.1. Dati dei sensori meteorologici *in situ*, così come misurati 21

3.1.2. Griglie di dati interpolati dei sensori meteorologici *in situ,* senza la componente modellistica 22

3.2. *DATASET* AVULSI DA OSSERVAZIONI *IN SITU* 23

3.2.1. *Hindcast* o *Historical re-forecast* 23

3.2.2. Dati dall'archivio di output dei modelli previsionali 23

3.3. DATASET DA OSSERVAZIONI INDIRETTE E/O REMOTE 24

3.3.1. Dati da satelliti 24

3.3.2. Dati da radar meteorologici 25

4. CASE STUDY 27

4.1. VALUTAZIONE DELLE *PERFORMANCE* DI ALCUNE TIPOLOGIE DI *DATASET* 27

4.1.1. La precipitazione 27

4.1.2. La temperatura 36

4.2. POLIZZE PARAMETRICHE PER L'AGRICOLTURA BASATE SU *DATASET* DI RIANALISI AD ALTA RISOLUZIONE 41

5. NOTE 45

6. BIBLIOGRAFIA 47

"Oh, I believe in yesterday…"

(J. Lennon, P. McCartney, "Yesterday". The Beatles, *Help!*, 1965)

1. INTRODUZIONE

1.1. OBIETTIVI

La componente meteorologica e climatica si sta imponendo come variabile quantitativa nel disegno delle prossime e future configurazioni dell'atmosfera, e nelle sue interazioni con l'uomo, con la società, con il pianeta. Questo processo viene favorito dall'innovazione e dallo strumento digitale, i quali hanno dato il via ad una crescente richiesta di dati meteorologici storici rappresentativi e coerenti, adatti cioè ad elaborazioni statistiche consistenti. Tale esigenza viene soddisfatta anche mediante l'applicazione delle tecniche di rianalisi, o analisi retrospettiva, le quali forniscono *dataset* storici e *near real-time* ordinati per griglie territoriali regolari di diversa dimensione, ricavati comunque dalle osservazioni meteorologiche *in situ*.

In ambiti di mercato, si assiste frequentemente alla formulazione di proposte che poco hanno a che vedere con un'applicazione metodologicamente corretta dell'analisi retrospettiva. In Italia, escludendo in buona parte il mondo della gestione del rischio, ciò è dovuto all'inadeguata preparazione specifica dell'acquirente, conseguente ad una carenza di critica e di presidio sul tema da parte dell'Accademia e delle Istituzioni. Con il Quaderno si intende quindi affrontare il tema della rianalisi in termini pragmatici ed operativi; non si tratta di un testo scientifico, bensì di una guida professionale sulle modalità di acquisizione e di utilizzo dei dati originati dal processo rianalitico.

Con lo scopo di favorire un maggior discernimento da parte dell'utente, vengono anche prese in considerazione altre tipologie di *dataset*, di minor consistenza statistica, ma pur anche fruibili in contesti definiti e circoscritti; esse, categorizzate sotto la voce "pseudo rianalisi", non vanno confuse con la solida costruzione retrospettiva, contro la quale esercitano una facile concorrenza in termine di prezzi ma non in termini di qualità.

Poiché la rappresentatività dei dati meteorologici è sempre collegata all'uso cui essi sono destinati, si intende specificare che questo documento non è orientato alle applicazioni di meteorologia che abbiano una finalità operativa immediata, il cui valore quindi si esaurisca nell'informazione stessa, bensì all'uso dell'informazione meteorologica come parte di un processo più complesso, che sia in grado di rappresentare un determinato stato dell'atmosfera in un determinato momento ed a fornire quindi un contenuto formale, ed ovviamente convenzionale, in contesti contrattuali, assicurativi, legali e comunque probatori[3].

Per definire meglio questo contorno, si specifica che il testo si basa sulle innumerevoli esperienze maturate *in-house* nell'erogazione di servizi a carattere rianalitico verso compagnie di gestione del rischio, che nella parte normativa si fa riferimento alle indicazioni della WMO[4] e che le elaborazioni utilizzate sono quelle prodotte da centri di ricerca europei ed internazionali.

Fra gli impieghi professionali della rianalisi climatica, si presume che il ruolo di maggior rilievo verrà, nel tempo, occupato dalla conoscenza dei parametri connessi al problema del riscaldamento globale; sarà quindi destinata ad una platea ampia e trasversale, verso la quale si dovrà qualificare come piattaforma credibile e condivisibile di riferimento. Ciò pone alcune considerazioni di fondamento, su tutte una: l'urgenza di avviare un processo di appropriazione del tema meteorologico e climatologico da parte della società civile in senso lato, cioè di tutti coloro che possono o devono portare il loro contributo al tema della mitigazione del riscaldamento globale, arricchendone i contenuti e moltiplicandone le opzioni, contribuendo quindi ad una più ampia inclusione, ad una condivisione delle scelte e quindi ad un loro maggior successo. Si tratta di processi che non vengono

sanciti *ex lege*. In essi, un ruolo chiave viene assunto dai mondi della cultura e della comunicazione, chiamati a favorire un ampliamento di orizzonti ed un rapido superamento dell'angusto ambito della meteorologia, la quale è chiamata a svolgere una funzione tecnica di monitoraggio e di certificazione, ma la cui limitata rappresentatività e la cui debolezza istituzionale non sono in grado di sostenere la cogenza di scelte che saranno incisive ed a volte radicali.

Ebbene, in questa logica la rianalisi, che ci racconta il passato e ci prospetta il futuro, si propone farlo con parole chiare, non come un oracolo fumoso o velato dal sipario tecnologico, ma ricercando radici e linguaggi comuni, per favorire una lettura aperta a tragitti laterali e ad altre sensibilità.

Ancora una volta la meteorologia fornisce il proprio contributo di tecnologia, di conoscenza e di sensibilità per una visione unitaria e globale del mondo, come è nella sua tradizione sin dalla nascita dell'IMO[5] nel 1879, ed alla successiva cooptazione nella WMO[4], nel 1951, come Agenzia tecnica intergovernativa delle UN[6].

1.2. BREVE CONTESTUALIZZAZIONE CULTURALE DELLA LETTURA DEI FENOMENI ATMOSFERICI IN EPOCA CONTEMPORANEA

La rianalisi meteorologica è lo strumento che consente di quantificare le dinamiche meteorologiche e climatiche di tutto il pianeta, sia nel loro insieme per i fenomeni di scala planetaria, che nelle espressioni più specifiche e locali. Essa restituisce una visione organica ed unitaria dei parametri meteorologici, distribuendoli su di una maglia a griglia uniforme, adatta alle applicazioni statistiche ed alle elaborazioni più spinte. Questo metodo prende le mosse da un'analisi storicistica del passato, poiché l'atmosfera, così come la terra, evolve in tempi relativamente lunghi e concede quindi una visione dei propri *trend* all'osservatore attento. Assumendo una continuità panottica fra passato e futuro, in una prospettiva di periodo lungo o infinito il parametro temporale viene meno[7], e questo paradosso, nel quale rimane intrappolata anche la tartaruga di Zenone[8], rende possibile l'emergenza di serie storiche e di *dataset* cristallizzati in griglie regolari, sostenute da un approccio statistico corretto, robusto e comunque adeguato alle esigenze.

Il futuro quindi si annida nel passato, e lo sforzo retrotopico[9] è quello di renderlo più leggibile, più decifrabile, più confrontabile; in questo senso la rianalisi si pone come un campo comune, oggettivo e condiviso di verifica e di confronto. Infatti, in tempi di emergenza climatica, è bene considerare come il tema della conoscenza, dell'accessibilità e della trasparenza dei dati meteorologici, nonché della loro aderenza alla realtà, debba rientrare fra i canoni sui quali misurare le caratteristiche di una società aperta ed in lento e graduale progresso umano[10]**.**

Il clima, infatti, non costituisce più una sola mera componente abiotica dell'ecosistema terra, un fattore con il quale l'umanità ha condiviso i millenni e cui si è adeguata, anche nelle sue espressioni più forti, pur con maggiori o minori tempi di resilienza. Nei prossimi anni potrebbero venir superate tolleranze, soglie e tempi di ritorno, e venir frantumati equilibri territoriali, ambientali, economici e geopolitici. Il problema quindi non è tecnico, anzi, deve assolutamente uscire dal recinto dell'iperrealismo tecnologico digitale, per aprirsi ad un paradigma epistemologico che ne garantisca comprensione, condivisione e coscienza da parte e dell'insieme degli individui e della società intesa come *corpus*.

Il prodotto di rianalisi rappresenta la matrice su cui si possono oggettivamente calare e confrontare tutte le diverse sensibilità e politiche. D'altronde la meteorologia e la climatologia non sono avulse dal contesto storico, culturale, sociale ed economico; lo condizionano e ne sono a loro volta influenzate. La crescente attenzione generale ne sta favorendo una lettura multipla, che potrà metterne in luce aspetti, contenuti e prospettive ad oggi sfuggiti alla mera analisi tecnica, e forse in grado di incidere positivamente sul piano delle soluzioni e comunque imprescindibile sulla loro efficacia. Obiettivi di tal genere richiedono una forte contestualizzazione tematica ed un abbinamento storico che insinui ed apparenti questa sensibilità con altri livelli della conoscenza, per consentirne l'appropriazione culturale e l'identificazione diffusa. Essendo frutto del proprio tempo, le convergenze e le affinità con l'approccio rianalitico non mancano; se ne propone un breve tassello, limitato agli anni più recenti.

Una definizione consona a questa ricerca di correlazione, e già matura per la successiva epoca digitale, è quella concepita da Henry Leborit[11] negli anni '70; egli rappresenta l'esigenza di: "*…immaginare nuove griglie concettuali, nuove strutture che assumano l'essenziale dell'apporto dell'insieme delle discipline biologiche, e non in parti staccate, ma sotto una forma integrata, che partendo dalla fisica arrivi alla specie umana nella biosfera, nel tempo dell'evoluzione e in quello dell'individuo, nello spazio gratificante di un uomo e di tutti gli uomini, il pianeta*" . Essa racconta molte cose: rappresenta anzitutto una visione olistica di griglia intesa come *concept*; corrisponde all'esigenza di una lettura discretizzata del mondo, che sia in grado di rappresentare le grandi sintesi d'insieme ma anche i dettagli non sfuocati delle piccole scale; converge nell'uomo e nell'insieme di conoscenze che lo riguardano.

Si tratta di una lettura ad impronta strutturalistica, che aveva già anticipato Claude Lévi-Strauss[12] applicando alle grandi escatologie il "pensiero selvaggio", e scoprendo un'umanità, o meglio un insieme di individui, alla ricerca continua di una propria ubicazione all'interno dell'universo, e quindi di una sua miglior definizione. Lettura ampiamente confermata, riproposta ed approfondita da Zygmunt Bauman[13] nella sua rappresentazione dell'individuo perso nel mare della liquidità e di una "modernità" che consiste nella continua rincorsa verso un'irraggiungibile "post modernità".

Volendo annotare un altro punto di partenza convergente in questa visione innovativa del mondo fisico, è opportuno ricorrere alle arti figurative, le quali compendiano questa esperienza nelle proprie forme, oltre che nei propri contenuti, proponendone quindi una visione efficace, aperta ed universale, come è nella loro natura. E questo seme trova dimora, a fine '800, nella raffinata ricerca pittorica di Georges Seurat che, durante il lungo interregno fra impressionismo ed espressionismo, utilizza il *pointillisme*[14] per affidare alla tela il potere astrattivo del pixel il quale, nel duplice ruolo di vettore e di gregario, supera i toni progressivi dei colori per fornire soggettività ed autorevolezza ad ogni punto della tavolozza e, con Vincent Van Gogh, ad ogni pennellata. Si tratta di una tecnica che, proprio grazie alla sua una matrice divisionista, può proporre angolature diverse della realtà, di minore o maggiore dettaglio, di maggiore o minore profondità: dalle poche pennellate di una sintesi paesaggistica, che indica l'applicazione di una maglia piuttosto larga per ogni singolo tratto (*Figg. 1 e 2*), sino ad una scomposizione analitica di colori che si affiancano in un grigliato infinitesimale, in cui i singoli pixel quasi sfuggono nella visione d'insieme, salvo riaffacciarsi ad un'analisi attenta del dettaglio (*Figg. 3 e 4*).

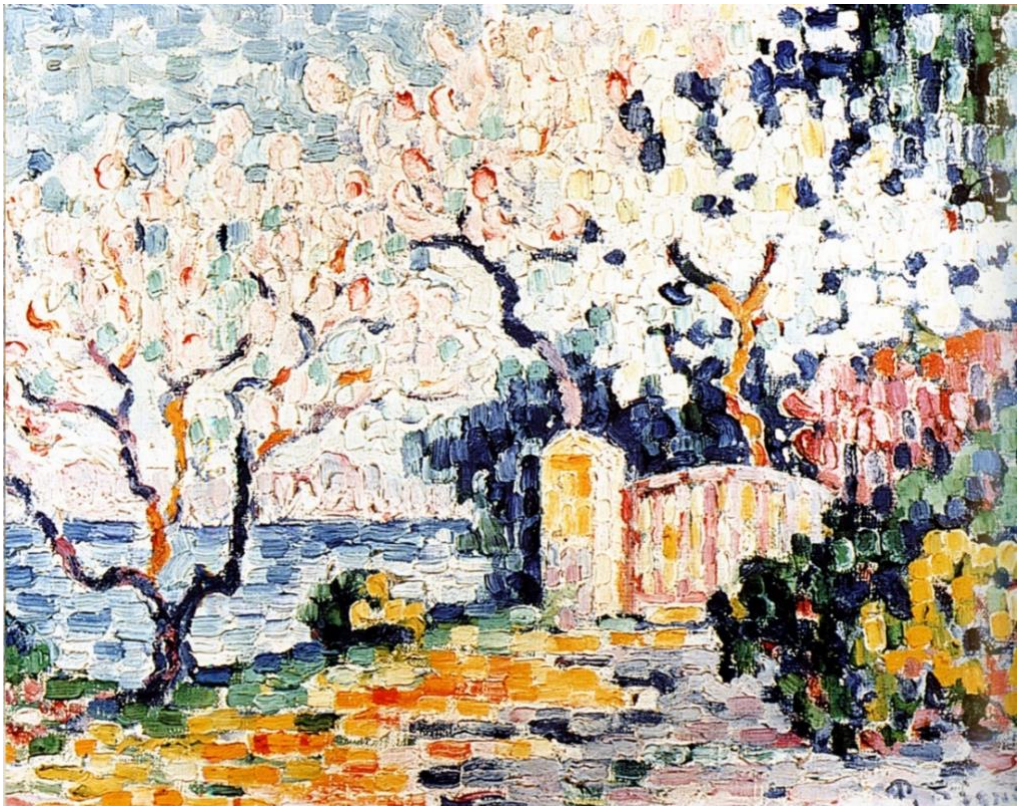

Fig. 1 Paul Signac: "Alberi in fiore". Fine '900

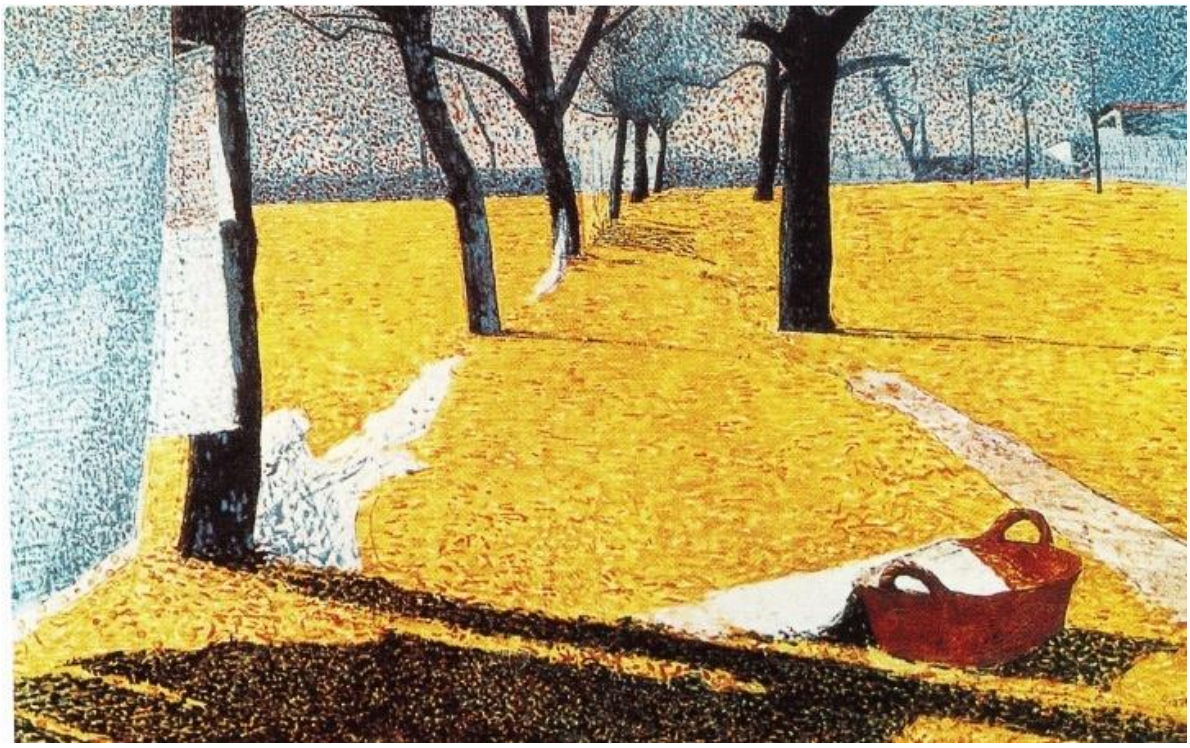

Fig. 2 Giuseppe Pellizza da Volpedo: "Panni al sole". 1894

Fig. 3 Georges Seurat: "Una domenica pomeriggio sull'isola della Grand-Jatte". 1884-86

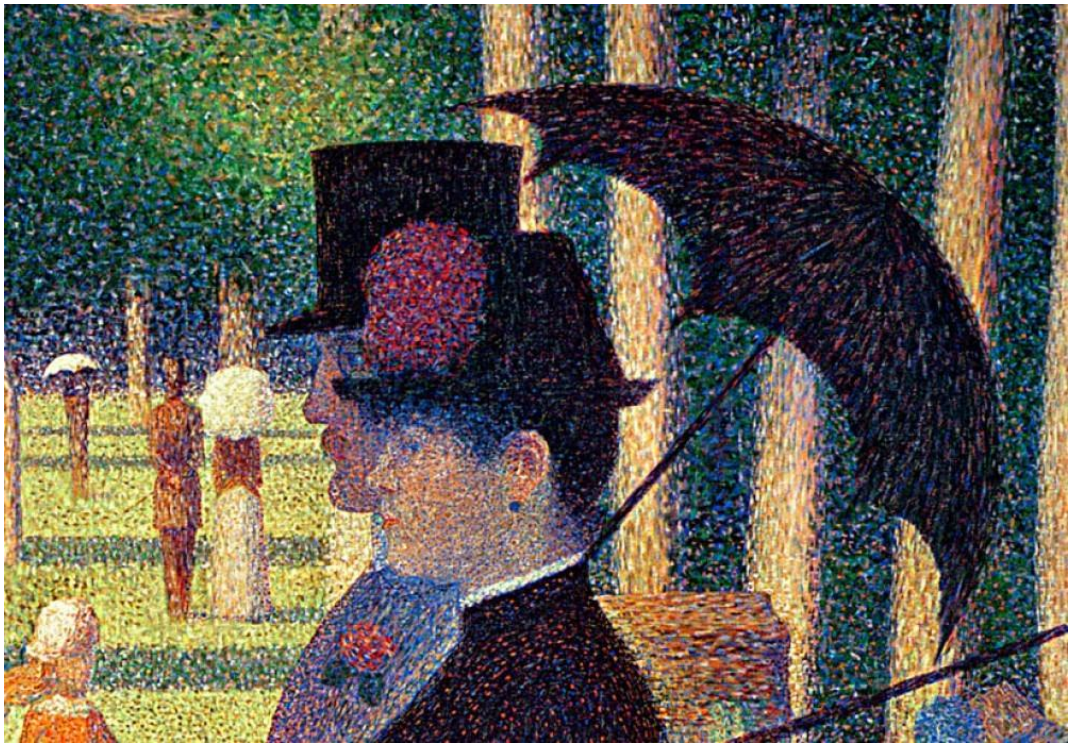

Fig. 4 Georges Seurat: "Una domenica pomeriggio sull'isola della Grand-Jatte". Particolare. 1884-86

La realtà quindi si concretizza e sceglie la propria cifra in forme di rappresentazione che sono frutto di una triplice contemporaneità: del momento espressivo e culturale contingente, che fornisce la tecnica e la tecnologia impiegata, dei retaggi recenti e remoti, che portano le loro nostalgie ed i loro segni, ed infine della visione futura, spesso elitaria ed isolata.

Si tratta di archetipi profondi, che sono stati qui proposti nelle loro accezioni più recenti o contemporanee, ma che trovavano radici lontane e remote nel mito, e nella sua graduale evoluzione verso la trascendenza. Questo arcano viene oggi affidato, almeno in parte, al digitale, e converge in una rappresentazione antropologica che vede l'uomo nell'affannosa ricerca di una propria posizione universale attraverso un percorso caratterizzato non tanto dall'ineludibile costante temporale, quanto da una modifica di spazi e contesti, la cui inarrestabile liquidità spinge alla continua ricerca di isole più sicure, che si vogliono definite nel rigore del metadato.

1.3. LO SCENARIO NAZIONALE

Il tema della rianalisi viene toccato dal mondo accademico nazionale in modo marginale, con una visione limitata ad applicazioni che spesso prescindono dal contesto economico e sociale. Le istituzioni meteorologiche pubbliche, da parte loro, non ne hanno un'adeguata conoscenza, o quanto meno una pratica operativa. Ciò è dovuto al grave *vulnus* rappresentato dalla mancanza di un Servizio Meteorologico Nazionale e dalla sua frammentazione in una miriade di agenzie ed uffici locali, oggetto di continui e purtroppo reiterati tentativi di coordinamento, peraltro inutili se privi del necessario sigillo costituzionale. La mancanza di una visione meteorologica e climatologica nazionale avvilisce l'esigenza di un superiore livello di conoscenza, limita l'impegno degli uffici alle attività operative, riduce il confronto, la presenza ed il coordinamento internazionali.

Questa povertà strutturale ha aperto le porte alle incursioni commerciali di aziende europee ed extra europee, le quali propongono i prodotti di rianalisi a grande scala, oppure prodotti ottenuti mediante le pseudo rianalisi. Il patrimonio storico nazionale di dati meteorologici consentirebbe invero di elaborare e proporre prodotti da rianalisi molto raffinati, infatti l'Italia è dotata di un importante sistema di monitoraggio meteorologico costituito da migliaia di stazioni *in situ*, sia pubbliche che non, dalla rete nazionale di radar meteorologici e da numerose reti private di monitoraggio delle fulminazioni.

Inoltre, le "Linee guida del patrimonio informativo pubblico" [15] emanate dall'Agenzia per l'Italia digitale della Presidenza del Consiglio dei Ministri e la stessa "Carta dei servizi" ISTAT[16] forniscono un palinsesto normativo molto avanzato in merito alla diffusione dei dati ed al coinvolgimento della società civile nell'aggregazione di valore alle osservazioni meteorologiche, che vanno considerate un patrimonio pubblico comune.

1.4. LO SCENARIO INTERNAZIONALE ED EUROPEO

La WMO[4] segue con attenzione questa tecnologia, le cui prospettive e modalità di sviluppo rivestono un ruolo strategico, perché essa è chiamata a coordinare un insieme di sistemi osservativi distribuiti nel mondo con diversa densità e tipologia di strumentazione, in frequente aggiornamento, utilizzati per scopi differenti e non sempre climatologici. La rianalisi è in grado di ricondurre a sistema e di aggregare valore a questa geografia articolata, in quanto i *dataset* ottenuti producono stime di campi continui basati su più fonti di osservazione, producono dati per tutti i punti dello spazio e del tempo, consentono inoltre di ottenere variabili meteorologiche non facilmente o regolarmente osservate. Essa, quindi, contribuisce ad incrementare le conoscenze meteorologiche in aree sinora poco monitorate o su parametri ritenuti secondari, anche se non può certo sostituire un buon sistema osservativo il quale, tra l'altro, e pur con le proprie debolezze, è l'unico in grado di consentire l'estrazione di un buon prodotto rianalitico.

Un punto chiave della *policy* WMO è rappresentato dall'indicazione che i *dataset* ottenuti debbano essere digitalizzati su formati standard, al fine di rendere liberamente disponibili il maggior numero di osservazioni possibili, e che siano integrati da un quadro adeguato di metadati. La WMO elenca anche una platea esemplificativa di interessati:

- valutatori indipendenti;
- cittadini;
- aziende;
- società in generale;
- organizzazioni in generale;
- operatori del settore;
- portatori di interessi per la meteoclimatologia;
- portatori di interessi di carattere storico, culturale, statistico;
- portatori di interessi legati all'emergenza climatica.

Sotto il profilo analitico, poiché i *dataset* meteo-climatici derivati dalle osservazioni non vanno essi stessi considerati come valori assoluti, ma come punti di convergenza di ipotesi correlate alla misura di una specifica variabile atmosferica per un determinato scopo, l'organizzazione sottolinea che non esiste un *set* di analisi universale, definitivo ed unico per tutti gli scopi. Poiché questo obiettivo non è realistico, e neppure fruibile, viene consigliata la realizzazione di più *dataset* specifici per i diversi usi, o di *set* di dati affiancati e confrontabili; questa opzione di ipotesi concorrenti dovrebbe infatti favorire il miglioramento qualitativo dei *dataset*, poichè li sottopone ad una verifica da parte degli utenti nei diversi campi di applicazione.

In ambito europeo il tema si compone di più sfaccettature: da una parte ECMWF[17], l'organismo tecnico intergovernativo ed indipendente che opera efficacemente e con standard elevatissimi nella realizzazione di *dataset* di rianalisi globale, dall'altra la Presidenza della Commissione, che definisce le *policy* di comunicazione. Da vari anni si assiste allo sforzo congiunto per la realizzazione di una rete di *data open and free* in tutti i settori, ed in particolare in quello scientifico. Questo impegno trova sintesi nella recente Direttiva EU 1024/2019 "Apertura dei dati e riutilizzo dell'informazione del settore pubblico" che scandisce una visione illuminata ed aperta, e definisce il ruolo di supporto che devono assumere le amministrazioni pubbliche verso i cittadini, la Cultura, l'Economia e la Società nel suo complesso.

Oltre i confini europei, ed in particolare nel mondo anglosassone, i principali Istituti e centri di ricerca[18] perseguono già da tempo una linea di ampia liberalizzazione, sia per quanto attiene i dati ricavati dalle osservazioni che i *dataset* di rianalisi.

2. LA RIANALISI (O ANALISI RETROSPETTIVA) METEOROLOGICA

2.1. ORIGINE E PROSPETTIVE

La tecnica della rianalisi è stata introdotta ed utilizzata per la produzione dei primi *dataset* a partire dalla seconda metà degli anni '90, periodo nel quale la tecnologia informatica aveva raggiunto uno sviluppo sufficiente per supportare questa tipologia di analisi modellistica particolarmente complessa e computazionalmente onerosa.

Questa esigenza trovava origine nella necessità della comunità scientifica di operare su dati continui ed omogenei nel tempo e nello spazio, di superare quindi il problema dell'elevato tasso di discontinuità associato alle misure tradizionali.

Successivamente, questi *dataset* hanno acquisito un peso significativo dovuto al rilevante incremento della domanda di una meteorologia più definita, precisa e rappresentativa da parte di un esteso mercato industriale. Oggi, i settori ad avanzata applicazione digitale sono in grado di massimizzare il vantaggio che deriva da questi prodotti. Nella gestione del rischio essi assumono un ruolo strategico per l'*assessment* di nuove formule o tipologie di polizza (*index*, parametriche) e per lo sviluppo di prodotti finanziari come i derivati meteorologici (*Weather derivatives*); nella *smart agriculture* essi alimentano i DSS[19] ampiamente utilizzati sia in chiave agronomica che ambientale; nelle aree di attività delle *Utility* e dei Consorzi di bonifica ed irrigazione, e quindi energia e ciclo idrico, supportano la progettazione e la gestione delle reti e delle risorse, nonché le strategie di approvvigionamento e di vendita; e così in tutte le applicazioni digitali di tipo *smart*.

Infine, con l'insorgere di una maggior sensibilità sociale verso il tema dell'emergenza climatica, è in piena evoluzione il processo di acquisizione culturale della sensibilità climatologica sia da parte di alcune *élites* sociali che di alcuni laboratori politici avanzati, i quali hanno iniziato a cogliere questa esigenza, pur non rappresentandola ancora adeguatamente in termine di prassi. Il tema, che sembra aver superato l'omologazione scientifica, rimane ancora retaggio di una comunicazione a carattere descrittivo e generalista, che va integrata con una solida struttura quantitativa di riferimento, sia per definirne le dimensioni che per monitorarne gli effetti mitigativi che si volessero adottare.

2.2. DEFINIZIONE

In meteorologia, la rianalisi, o analisi retrospettiva, definisce il metodo scientifico impiegato per realizzare un archivio globale delle modalità secondo le quali cambiano, nel tempo, i parametri meteorologici. In essa vengono combinati i modelli di simulazione con le osservazioni reali, per generare una valutazione sintetica dello stato dell'atmosfera. I *dataset* ottenuti vanno a popolare un sistema regolare di griglie, le cui dimensioni e caratteristiche dipendono dalla specifica applicazione richiesta. In termini logici, la rianalisi è in grado di rappresentare un passato più coerente di quello che ci era noto, e di utilizzare questa conoscenza per delineare un futuro altrettanto storicamente attendibile.
La rianalisi non è quindi una osservazione, ma origina un dato basato sulle osservazioni; sono queste ultime, quindi, che forniscono il contenuto informativo essenziale dei prodotti, e ne definiscono anche il livello qualitativo o la precisione. Le complessità e le incertezze del sistema di osservazione, la selezione dei dati, il

controllo di qualità e la correzione dei *bias*, possono avere un effetto cruciale sui risultati del processo; in altri termini la rianalisi, senza le osservazioni, è una pura elaborazione modellistica e il *dataset* risultante è destinato a contenere tutti le debolezze che da questa possono derivare.

La rianalisi consente di sviluppare *dataset* sull'andamento meteo-climatico trascorso, sia vicino (*near real-time*) che storico, potendo spingersi fino alle prime serie di osservazioni strumentali affidabili; essa rappresenta quindi uno strumento fondamentale di studio della variabilità climatica e di comprensione dei meccanismi climatici, e come tale si può considerare una delle principali acquisizioni della meteo-climatologia recente.

Fig. 5 Rappresentazione schematica di griglia globale ottenuta mediante il processo di rianalisi

2.3. CARATTERISTICHE SALIENTI

Partendo da una base adeguata di osservazioni, la rianalisi è in grado di generare *dataset* meteorologici dotati delle seguenti caratteristiche:

- copertura completa della superficie terrestre;
- elevata rappresentatività dell'effettivo andamento meteoclimatico su tutto il territorio geografico coperto, anche nelle aree prive di reti di monitoraggio *in situ*;
- eliminazione o riduzione di discontinuità e disomogeneità spazio-temporali.

Altra sua peculiarità è la distribuzione di questi dati su griglie regolari di dimensione diversa, variabile in base alla specifica applicazione ed all'accuratezza richiesta o possibile (*Fig. 5)*.

Anche la profondità temporale è funzione dell'impiego, nel senso che deve essere funzionale alla visibilità delle dinamiche meteo-climatiche ricercate, le quali potrebbero per esempio venir appiattite in una scala eccessivamente dilatata.

2.4. METODO

Dal punto di vista metodologico, la rianalisi raccoglie tutti i dati misurati dai diversi sistemi di monitoraggio meteorologico (sensori *in situ* e sensori remoti); questi vengono assimilati ed elaborati da un modello numerico di previsione atmosferica, ed eventualmente post processati mediante l'utilizzo di co-variabili ausiliarie (DEM[20]); l'*output* del processo vede la distribuzione dei dati elaborati su di una griglia uniforme, di scala variabile, che fornisce un contenuto informativo per ogni punto del dominio, a prescindere dalla presenza, in quel punto, di una stazione meteorologica o di un sensore che lo attinga (*Fig. 6*).

Fig. 6 L'insieme delle osservazioni costituisce il fondamento per la realizzazione di griglie di dati mediante la rianalisi

Per un'applicazione corretta, è necessario disporre di due elementi caratterizzanti e fondamentali:

- un ampio e profondo *set* di osservazioni, anche da diversa fonte (*in situ* e da remoto);
- un modello di previsione atmosferica, e relativo sistema di assimilazione dati, la cui configurazione sia definita con chiarezza e non subisca alcuna variazione durante tutto il processo.

Inoltre, in utilizzi professionali specifici, a valle del processo di rianalisi è spesso necessario effettuare operazioni di *post-processing*, quali ad esempio:

- *downscaling* mediante l'utilizzo di DEM[20] a più alta risoluzione spaziale rispetto al *dataset* originario;
- riduzione del *bias* tramite processi statistici (MOS[21]);
- correzione dei campi "derivati", ossia di quelli elaborati dalla sola componente modellistica della rianalisi senza il contributo di osservazioni (es. radiazione solare, precipitazioni ecc.).

2.4.1. Le osservazioni

Come si è già avuto modo di sottolineare, la rianalisi non è una osservazione, ma origina un dato basato sulle osservazioni, le quali rappresentano il fondamento del processo. In sostanza, quindi, l'obiettivo della rianalisi è quello di rappresentare coerentemente le osservazioni disponibili.

Trattandosi della caratteristica principale che contraddistingue questa tecnica da altri processi di produzione di griglie meteorologiche, sulle osservazioni va operata una selezione approfondita. Rinviando, su questo tema, alla lettura di "Caratteristiche e rappresentatività della meteorologia di precisione nel contesto nazionale"[3], i dati meteorologici utilizzati per un processo rianalitico di qualità devono provenire da reti di monitoraggio adeguate, ed utilizzare *dataset* fruibili e robusti, che rientrino nelle seguenti categorie:

Caratteristiche delle reti *in situ*:

- **certificate**: si tratta di reti sottoposte a procedure formali di certificazione per quanto riguarda la tipologia di strumentazione installata, il posizionamento dei siti di rilevazione, le procedure di manutenzione e la validazione dei dati,
- **a norma WMO:** si tratta di reti afferenti ad associazioni, organizzazioni di ricerca, ONLUS, aziende di gestione del territorio che applicano le procedure di installazione, gestione, manutenzione e validazione definiti nelle Linee guida della WMO.
- **ufficiali**: si tratta di reti afferenti ad enti ed organizzazioni governative legalmente preposti al monitoraggio meteorologico-ambientale; in merito a queste ultime va segnalato che non sempre l'ufficialità garantisce la qualità della rete stessa e la sua corrispondenza ai parametri WMO.

Caratteristiche delle reti che operano in *remote sensing*, utilizzate sia in prima assimilazione che in *post processing*:

- **radar meteorologici,**
- **rilevamento dei fulmini,**
- **satelliti meteorologici geostazionari e polari.**

Caratteristiche dei dati:

- **accessibilità**: in formati *standard*,
- **continuità**: inseriti in una serie storica consistente,
- **disponibilità**: resi disponibili secondo i criteri open data,
- **fruibilità**: acquisibili in tempi utili,
- **terzietà**: non riferibili a parti,
- **trasparenza**: corredati dai metadati,
- **univocità**: che si prestano ad una unica interpretazione.

Caratteristiche dei *dataset*:

- **continuità:** nel tempo e nello spazio,
- **copertura:** adeguata e consistente,
- **invarianza:** nel tempo dello stesso *dataset* nativo,

- **omogeneità:** costanza nel tempo e nello spazio della rappresentatività,
- **rappresentatività:** definita.

Nonostante il rispetto di questi standard, è opportuno che il sistema di assimilazione provveda comunque ad effettuare un controllo della qualità dei dati disponibili ed a rimuovere i *bias* di alcuni *set* di osservazioni (es. satellitari), consentendo alla rianalisi di acquisire solamente le osservazioni coerenti con lo stato reale dell'atmosfera.

2.4.2. Il modello di previsione atmosferica e il sistema di assimilazione dati

Nella rianalisi, il sistema di assimilazione dati è accoppiato ad un modello di previsione atmosferica; il primo "forza" il sistema ad essere consistente con le osservazioni, il secondo mira ad ottenere una coerenza fisica tra le variabili, mantenendole in linea con le leggi della fisica che governano i moti atmosferici. Un modello sufficientemente realistico è in grado di estrapolare le informazioni dai parametri osservati localmente e di propagarli a località vicine, anche nel loro sviluppo temporale.

Va specificato che, nel caso delle precipitazioni, il modello non assimila il dato del parametro, ma lo sviluppa in modo "derivato", mediante la risoluzione delle equazioni differenziali che descrivono le dinamiche atmosferiche attraverso altre variabili base, quali la temperatura, l'umidità, il vento, la pressione. Se valutato in un contesto meteorologico, questo metodo determina un livello di incertezza significativo nel caso di precipitazioni convettive, e più contenuto negli eventi stratiformi.

In un contesto climatologico, invece, la compensazione delle incertezze sui singoli eventi rende questo tipo di *dataset* uno strumento adeguato all'uso.

Inoltre, sempre attraverso il modello ed i soli parametri di base, è anche possibile ottenere stime piuttosto accurate di variabili non direttamente misurate dai sistemi di osservazione, come la radiazione solare, la copertura nuvolosa, la temperatura al suolo o a quote diverse.

Ogni *dataset* di rianalisi utilizza un proprio specifico modello, caratterizzato dal tipo di griglia, dalla sua risoluzione spaziale, dal numero di livelli verticali, dall'altezza del livello superiore, dalla formulazione delle parametrizzazioni fisiche e dalla scelta delle condizioni al contorno. Modelli complessi forniscono, normalmente, risultati più performanti.

In *Fig. 7* viene illustrato un esempio di processo di assimilazione dati accoppiato ad un modello di previsione atmosferica. Si tratta di un sistema chiamato 4D-VAR (le 3 dimensioni spaziali e quella temporale) in quanto l'assimilazione delle osservazioni non avviene solo per l'istante temporale iniziale della previsione, ma per una finestra temporale continua. La linea rossa tratteggiata rappresenta la traiettoria della previsione che avrebbe intrapreso il modello senza l'acquisizione delle osservazioni. Essa viene "corretta" in tutta la finestra temporale del ciclo di rianalisi, minimizzando le differenze rispetto alle osservazioni. La previsione di ogni ciclo (che può essere, ad esempio, di 12 ore) fornisce il "*first guess*" del ciclo successivo. L'iterazione del processo produce la rianalisi meteorologica per ampie finestre temporali.

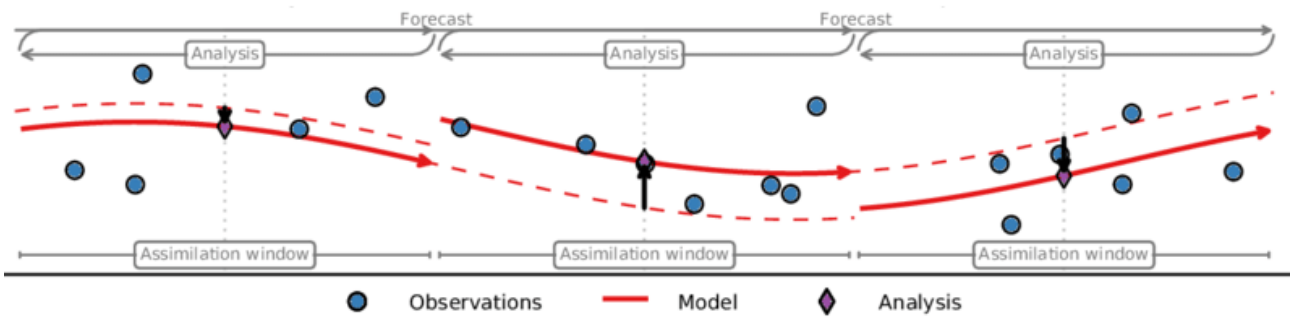

Fig. 7 Rappresentazione schematica semplificata di un sistema incrementale 4D-VAR. Fonte: Fujiwaraa et al. - Introduction to the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems

Un'altra caratteristica fondamentale della rianalisi consiste nel fatto che la configurazione del binomio "modello previsionale-sistema di assimilazione dati" deve essere mantenuta costante durante tutta l'elaborazione, per evitare l'insorgenza di disomogeneità spazio-temporali o di altri segnali spuri; questo aspetto è particolarmente rilevante nella produzione di *dataset* rivolti specificatamente allo studio del clima e della sua variabilità, ed all'individuazione di eventuali trend legati al cambiamento climatico.

Comunque, nonostante l'applicazione di questo metodo di approccio, va sottolineato come la rappresentazione dei segnali climatici sia inevitabilmente influenzata dagli aggiornamenti tecnologici e dai riassetti del sistema di osservazione globale. Questa circostanza incide sulla rianalisi, ed anche su tutte le altre forme di analisi storica delle osservazioni. I parametri meteoclimatici globali dell'atmosfera, utilizzati anche nella stima degli indicatori del cambiamento climatico, non sono d'altronde misurabili direttamente, e ciò comporta l'utilizzo di modelli e di analisi statistiche che estrapolano informazioni dalle misurazioni, le quali presentano, a loro volta, i noti limiti di rappresentatività e di incertezza. Si tratta di argomenti oggetto di dibattito scientifico, la rianalisi viene comunque considerata tutt'oggi il metodo più affidabile; la difficoltà che si può incontrare nel valutarne l'incertezza può essere mitigata da un contemporaneo confronto con i più tradizionali *set* di dati climatici di sola osservazione.

2.4.3. Il *post-processing*

Come viene spesso ricordato, ogni prodotto meteorologico va orientato ed è funzionale alla specifica applicazione, quindi utenti diversi (assicurazioni, energia, idrologia, agricoltura, ecc.) richiedono post-elaborazioni dedicate. Le procedure di *post-processing* consentono di soddisfare requisiti specifici, come i seguenti:

- Aumento della risoluzione spaziale (o temporale) delle variabili d'interesse rispetto al *dataset* originario. Questa procedura prende il nome di *downscaling* e può essere operata sia dinamicamente, mediante un sistema modellistico ad alta risoluzione che utilizza i dati del *dataset* di rianalisi originario sia come input che come valori al contorno, oppure statisticamente. L'elaborazione è spesso utilizzata, partendo da *dataset* globali o continentali, per ottenere informazioni più dettagliate a scala nazionale o regionale.
- Correzione statistica dell'*output* per una riduzione ulteriore del *bias* di variabili ad uso "operativo". Questa correzione può essere operata in modi diversi, una delle tecniche più impiegate è quella del MOS[21].
- Correzione statistica e puntuale delle variabili meteorologiche che vengono prodotte dalla rianalisi in modo "derivato", ossia dalla sola componente modellistica, in quanto le osservazioni non vengono

acquisite dal sistema di assimilazione. Un esempio significativo è rappresentato dalla precipitazione che, nei *dataset* di rianalisi, viene generata dinamicamente dalla componente modellistica sulla base di variabili base come temperatura, umidità e vento. È quindi necessario procedere a quel tipo di correzione del campo di precipitazione in fase di *post-processing*, utilizzando osservazioni di pluviometri e di radar meteorologici, al fine di rimuovere le derive "spurie" del modello.

A volte queste procedure portano le variabili a non essere più coerenti tra loro in senso fisico, in quanto agiscono selettivamente sui parametri *target*. L'effetto che ne risulta porta ad un miglioramento del risultato negli impieghi professionali ed operativi, fornendo un dato più coerente con la realtà. Ciò può non valere nelle attività di ricerca scientifica.

Per rappresentare un caso concreto, si porta l'esempio della tecnica di *post-processing* impiegata da Radarmeteo[22] nell'elaborazione del campo di precipitazione. Per effettuare Il *merging* dei dati fra le reti pluviometriche ed i dati radar, è stato sviluppato l'algoritmo RainGis®, il quale fornisce come risultato la precipitazione accumulata ad una risoluzione spaziale di 1 km; il campo così ottenuto sostituisce quello elaborato dalla sola componente modellistica della rianalisi.

Il processo di elaborazione prevede la seguente sequenza:

- acquisizione dei dati radar-meteorologici;
- elaborazione del campo di precipitazione accumulata dal solo dato radar (conversione mediante la relazione *Marshall-Palmer*[23]);
- acquisizione dei dati dei pluviometri;
- correzione del campo di precipitazione radar con i dati dei pluviometri (*merging*).

In questo caso specifico il dato da *merging* post-processato presenta una *performance* notevolmente migliore nella rappresentazione dei reali quantitativi di precipitazione osservati. La correzione del campo di precipitazione radar con i dati dei pluviometri consente infatti di rimuovere in modo consistente le derive e le incertezze derivanti dalla misura radar, ma allo stesso tempo mantiene l'informazione relativa alla variabilità spaziale della precipitazione. Si è quindi in grado di ottenere la ricostruzione di un campo di precipitazione che rappresenta in modo adeguato, sia qualitativamente che quantitativamente, gli eventi precipitativi localizzati, operazione che risulta particolarmente ostica per tutte le altre tecniche di elaborazione (modelli, satelliti, interpolazione di stazioni ecc.).

2.5. I VANTAGGI

L'applicazione della rianalisi ha portato numerosi vantaggi sia alla meteorologia previsionale, per la quale il dato rappresenta la fase terminale del processo, sia ad altre innumerevoli applicazioni, e di matrice meteorologica e di diversa matrice, per le quali è necessaria una informazione meteorologica strutturata statisticamente e digitalmente. Se ne citano i principali:

- utilizza tutte le fonti osservative disponibili, incrementandone il valore economico ed ampliando la loro vocazione al multiuso;
- l'*output* presenta un elevato grado di coerenza con le misurazioni storiche;
- opera un'azione di *cross validation* tra diverse tipologie di sensori, anche indipendenti gli uni dagli altri;

- i dati vengono restituiti su griglie regolari, complete e omogenee; per ogni punto del territorio è quindi possibile ricavare un'informazione meteorologia rappresentativa di quella località, indipendentemente dalla presenza di una stazione meteorologica in situ, o di altri sensori;
- la spazializzazione del dato avviene seguendo le leggi fisiche che regolano i moti atmosferici e non tramite semplici metodi di interpolazione isotropica;
- i *dataset* risultanti sono omogenei nel tempo poiché si basano su di un *setup* modellistico costante per l'intera analisi;
- oltre alle variabili misurate, si possono ricavare anche quelle elaborate dalla sola componente modellistica (radiazione solare diretta e diffusa, evapotraspirazione, bagnatura fogliare, ecc.);
- fornisce una buona conoscenza meteorologica di base su territori coperti da reti rade o non adeguate;
- i *dataset* sono di fruibilità immediata da parte di operatori, analisti, statistici, anche privi di un consistente *back ground* fisico, meteorologico o climatologico, le cui istanze vengono risolte a monte.

2.6. I PRINCIPALI *DATASET* DI RIANALISI

Dal punto di vista del dominio geografico, i *dataset* di rianalisi si possono normalmente ricondurre a due tipologie:

- Globali, quando la griglia di calcolo, o dominio, copre l'intera superficie terrestre,
- Regionali quando la griglia di calcolo, o dominio, copre porzioni limitate del globo.

2.6.1. Rianalisi globali

I *dataset* di rianalisi globale sono generalmente elaborati dai principali centri meteorologici del pianeta, gli unici che hanno a disposizione risorse economiche, scientifiche e computazionali in grado di sostenere elaborazioni modellistiche così complesse. In questa sede si prendono in considerazione i due principali:

- ECMWF[17] - Unione Europea
- NCEP[18] - USA

Le elaborazioni prodotte sono contraddistinte da una griglia con risoluzione spaziale molto ampia, superiore ai 30 km. Esse svolgono due principali funzioni:

- supportano le analisi meteorologiche e climatologiche dei fenomeni di scala sinottica, o che abbiano un impatto su ampie porzioni del globo,
- forniscono i dati al contorno e quelli di inizializzazione per le rianalisi regionali.

Trovano quindi applicazione nello studio del riscaldamento globale e dei fenomeni sinottici (uragani, cicloni extra-tropicali) sia in campo scientifico che in altri ambiti, quali il *risk assessment* assicurativo.

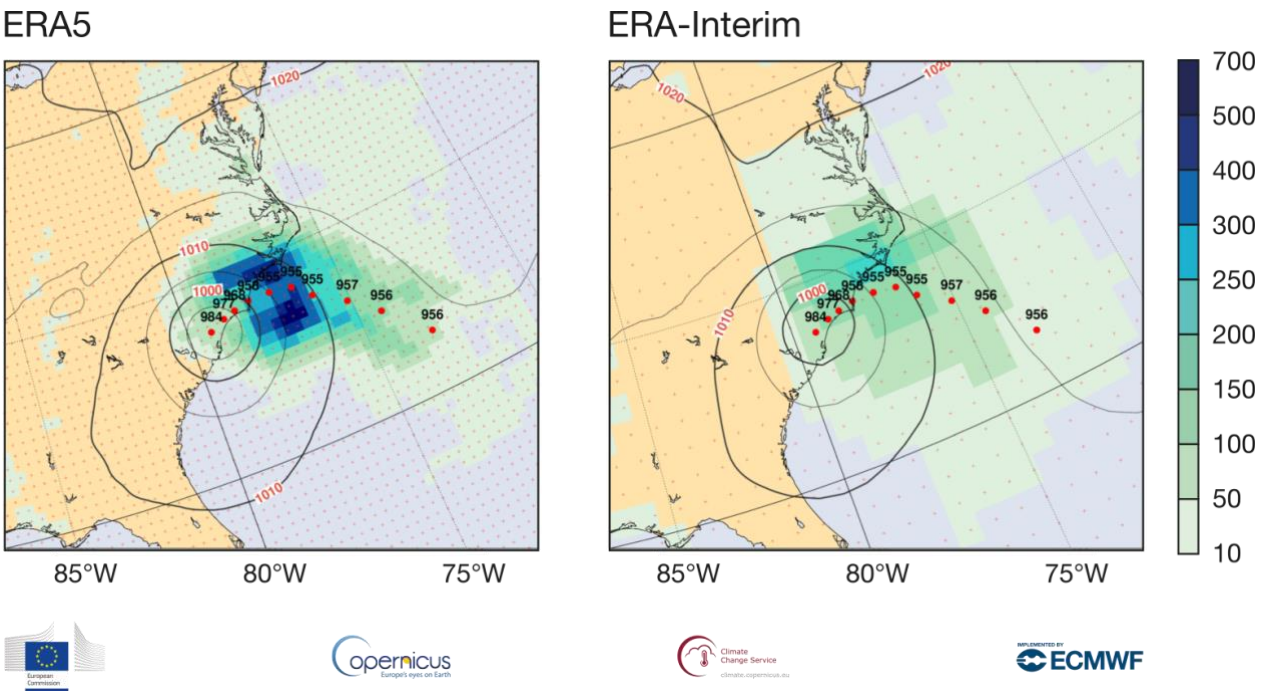

Fig. 8 Confronto tra le ricostruzioni dell'uragano Florence alle 09 UTC del 15 settembre 2018 tra ERA5 (sinistra) ed ERA-Interim (destra). Grazie alla maggior risoluzione e ed agli sviluppi della fisica del modello, il dataset ERA5 fornisce una ricostruzione più dettagliata dell'intensità del ciclone (valori di pressione più bassi, contorni in hPa) e del campo di precipitazione (accumuli in mm più elevati, rappresentati dai pixel colorati in gradazione di blu). Fonte: ECMWF

A partire dagli anni 90, entrambi i centri hanno sviluppato *dataset* globali di rianalisi via via più aggiornati ed avanzati; si fa riferimento in particolare ai seguenti:

- NCEP[18] / NCAR[18] *Reanalysis 1 (Kalnay et al.,The* NCEP/NCAR *40-year reanalysis project, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470, 1996*). Sviluppato dalla collaborazione tra NCEP e NCAR, esso utilizza la configurazione vigente *pro tempore* del sistema di analisi/previsione per eseguire l'assimilazione dei dati raccolti dal 1948 ad oggi; presenta una risoluzione spaziale di 2.5° (c.a. 250 km) e un passo temporale di 6 ore.
- NCEP[18] / CFSR[24] (*Saha, S., et al. The* NCEP *climate forecast system reanalysis, Bull. Amer. Meteor. Soc., 91, 1015-1057, 2010*). Il *dataset* è stato creato utilizzando un modello globale ad alta risoluzione che simula la dinamica accoppiata dell'atmosfera, dell'oceano, della superficie terrestre, del mare e della criosfera; esso copre il periodo temporale dal 1979 ad oggi, con una risoluzione spaziale di c.a. 38 km e un passo temporale orario.
- ERA[25]-*Interim (Berrisford et al., 2011*). Si tratta di una rianalisi atmosferica globale basata sulla versione 2006 dell'IFS (*Integrated Forecasting System* di ECMWF[17]); il sistema include un'analisi variazionale a 4 dimensioni (4D-Var) con una finestra di analisi di 12 ore; la risoluzione spaziale del *set* di dati è di 80 km e copre la finestra temporale dal 1979 al 2019 con passo di 3 ore.
- ERA[25]*5 (Copernicus Climate Change Service, 2017*). E' il nuovo *dataset* sviluppato da ECMWF[17] in sostituzione della rianalisi ERA-*Interim*; si basa su di un sistema di assimilazione dati 4D-Var e utilizza il ciclo 41r2 di IFS[26] operativo presso ECMWF nel 2016; ERA*5* beneficia quindi di un decennio di sviluppi negli ambiti della fisica del modello, della dinamica di base e dell'assimilazione dei dati rispetto a ERA-*Interim*; presenta inoltre una risoluzione orizzontale significativamente migliorata (31 km rispetto agli

80 km di ERA-*Interim*) ed il passo temporale orario; il *dataset* copre il periodo dal 1979 ad oggi (*Fig. 8*).

2.6.2. Rianalisi regionali

Parallelamente ai *dataset* di rianalisi globale, negli ultimi decenni si è assistito anche allo sviluppo di progetti di rianalisi a scala regionale. Essi rispondono all'esigenza crescente di ottenere *dataset* meteo-climatici di specifiche aree geografiche e rappresentano lo snodo applicativo che ha consentito l'utilizzo della rianalisi in diversi ambiti operativi, come le assicurazioni, l'energia, la gestione delle acque, e molte applicazioni di tipo *smart*.

Le caratteristiche principali e peculiari di questi prodotti sono le seguenti:

- consentono risoluzioni spazio-temporali più elevate rispetto ai prodotti globali;
- richiedono normalmente un minor numero di punti di griglia, di conseguenza diminuiscono le risorse computazionali necessarie per l'elaborazione, le quali possono quindi venir operate anche da enti, aziende e centri meteorologici locali;
- favoriscono un impiego più diffuso dei dati meteorologici in molti ambiti;
- rispetto alle rianalisi globali, consentono di formulare una storicità anche per tutti quei fenomeni a limitata scala spazio-temporali (es. temporali) che i modelli globali non sono in grado di simulare o simulano in maniera parametrizzata.

Per poter elaborare una rianalisi regionale è comunque necessario fornire al modello le condizioni al contorno del dominio geografico considerato. Le equazioni che guidano la simulazione, infatti, possono essere risolte solamente se hanno accesso alle condizioni atmosferiche delle celle di griglia limitrofe; per fare ciò, lungo i confini del dominio si utilizzano i dati di un *dataset* globale o di uno regionale il cui territorio comprenda l'area sottoposta all'elaborazione. Questo problema ovviamente non si pone nelle rianalisi a livello globale in quanto il loro dominio è rappresentato dall'intero sferoide terrestre.

In ambito europeo sono stati sviluppati diversi *dataset* di rianalisi regionale, tra cui:

- UERRA[27] *Regional Reanalysis for Europe*: questo *dataset* è stato sviluppato utilizzando il sistema modellistico UERRA-HARMONIE del ECMWF[17]. L'assimilazione delle osservazioni avviene tramite sistema 3D-VAR mentre i dati al contorno sono forniti dai *dataset* globali di rianalisi ERA[24]40/ERA-Interim (*Fig. 9*). La risoluzione spaziale del *dataset* è di 11 km ed il periodo di copertura va dal 1961 al 2019, con passo temporale orario. Il dominio geografico copre l'intero continente europeo, parte del nord-Africa e la Groenlandia.
- COSMO REA[28]6: rianalisi ad alta risoluzione sviluppata dal servizio meteorologico tedesco (DWD[29]) basato sul modello COSMO di cui sfrutta anche il sistema di assimilazione delle osservazioni integrato di alcuni moduli aggiuntivi per l'analisi della copertura nevosa, delle temperature superficiali dei mari e dell'umidità del suolo. I dati al contorno sono forniti dal *dataset* di rianalisi globale ERA[25]-Interim; copre il periodo dal 1995 al 2019 con passo temporale orario. Il *dataset* è stato sviluppato con dominio geografico centrato sul continente europeo e la sua risoluzione spaziale è di 6 km.

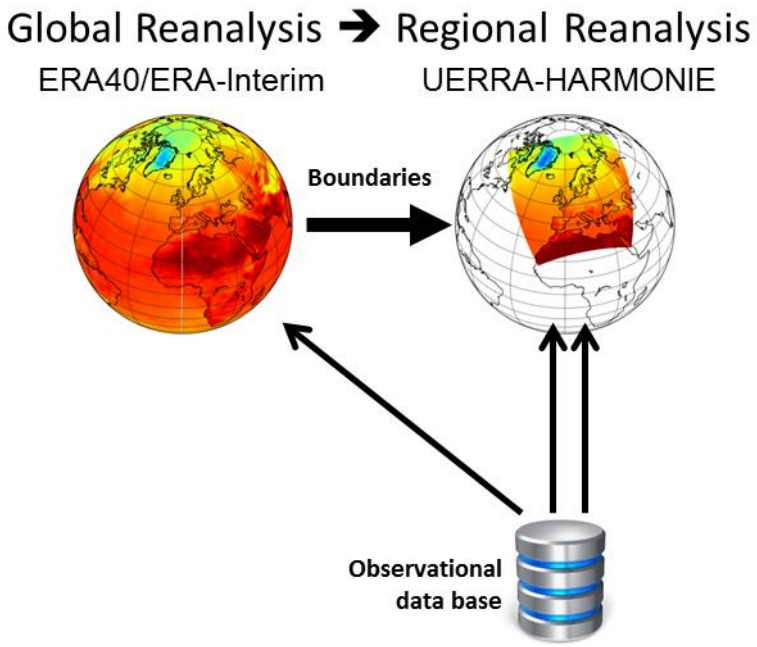

Fig. 9 Schema sintetico dei flussi di dati impiegati per l'assimilazione del sistema UERRA-HARMONY. *Fonte: Copernicus Climate Change Programme: User Learning Service Content*

3. LA PSEUDO RIANALISI: CLASSIFICAZIONE EMPIRICA DEI *DATASET*

La domanda di dati meteoclimatici storici è in crescita significativa. Si tratta di una variabile che, anche grazie al digitale, ha acquisito una rilevanza strategica nelle politiche industriali e nello sviluppo di nuovi modelli di *business*. La produzione di questi *dataset*, come si è visto nei precedenti capitoli, richiede l'applicazione di una metodologia scientifica precisa, che viene definita rianalisi o analisi regressiva. È certo possibile costruire *dataset* storici e *near real-time* anche utilizzando modalità e procedimenti diversi, ma si tratta di prodotti caratterizzati da una resa qualitativa inferiore, quando non modesta.

Pur tuttavia, i *dataset* così originati, che in questa sede vengono definiti di "pseudo rianalisi", trovano a volte impiego in applicazioni a carattere più generalista; essi vengono quindi succintamente descritti perché, conoscendone le caratteristiche, se ne valutino gli ambiti di utilizzo, ma anche i limiti in quanto:

- possono venir proposti come *dataset* di rianalisi;
- l'acquirente può non essere in grado di cogliere questa differenza;
- i prezzi molto contenuti possono favorirne l'adozione.

Se ne propone la seguente classificazione empirica:

- ***Dataset* da osservazioni *in situ***
  - Dati dei sensori meteorologici *in situ*, così come misurati;
  - Griglie di dati interpolati dei sensori meteorologici *in situ*, senza la componente modellistica.
- ***Dataset* avulsi da osservazioni *in situ***
  - Dati da *Hindcast* o *Historical re-forecast*;
  - Dati dall'archivio di *output* dei modelli previsionali.
- ***Dataset* da osservazioni indirette e/o remote**
  - Dati da satelliti;
  - Dati da radar meteorologici.

3.1. *DATASET* DA OSSERVAZIONI *IN SITU*

3.1.1. Dati dei sensori meteorologici *in situ*, così come misurati

I dati dei sensori meteorologici *in situ*, più comunemente noti come dati delle stazioni meteorologiche, sono certamente tra i più conosciuti e quindi maggiormente ricercati. Essi consistono nel valore di un determinato parametro misurato puntualmente a diverse scadenze temporali (giornaliero, orario, ecc.), e nelle serie storiche che ne derivano. Per la loro applicazione in sede di rianalisi come unico *input*, e quindi per la formazione di *dataset* robusti, i dati desunti dalle stazioni al suolo presentano molti punti deboli.

Applicabilità

- Le serie storiche ricavate dai soli dati delle stazioni possono trovare applicazione esclusivamente in un tipo di analisi che si limiti all'intorno della stazione stessa, esse infatti perdono rapidamente di consistenza all'ampliarsi dell'areale di interesse.

Limitazioni

- Carenze intrinseche:
  - serie temporali limitate, carenti, interrotte e non altrimenti ricostruibili;
  - malfunzionamenti ed errori di misura non verificabili con dati di altre fonti;
  - disponibilità di poche variabili, solitamente temperatura e precipitazione;
  - sostituzione e modifica dei sensori nel tempo.
- Carenze di rappresentatività:
  - si tratta di dati puntuali quindi spesso inadeguati a rappresentare un fenomeno meteorologico nella sua complessità,
  - la rappresentatività decade molto rapidamente con la distanza dalla stazione, con la complessità orografica e con i fenomeni di piccola scala (temporali);
  - distribuzione territoriale discontinua.
- Carenze ambientali:
  - modifiche nell'ambiente circostante (costruzioni, agricoltura, alberature, ecc.);
  - spostamento del sito;
  - disponibilità solo su terraferma.

3.1.2. Griglie di dati interpolati dei sensori meteorologici *in situ,* senza la componente modellistica

La formazione di griglie mediante la mera interpolazione dei dati raccolti dai sensori *in situ* può venir utilizzata per superare alcune delle fragilità che caratterizzano l'impiego dei soli dati.

Applicabilità

- Produzione di griglie regolari di dati, mediante le quali è possibile:
  - ottenere una copertura completa del territorio;
  - mitigare il problema della disomogeneità nella distribuzione delle stazioni di misura;
  - sopperire alla mancanza di dati in alcune zone;
- Produzione di campi continui nel tempo, dotati di buona profondità storica;
- Costi computazionali contenuti;
- Tempi di elaborazione contenuti.

Limitazioni

- Disponibilità di *dataset* limitati alle sole variabili standard (temperatura e precipitazione); il *dataset* spesso non si estende agli altri parametri e quindi neppure alle variabili derivate;
- Distribuzione isotropica del dato; pur ricorrendo alle co-variabili ausiliare per "guidare" l'interpolazione dei dati (es. DEM[20] per la temperatura), la loro distribuzione spaziale avviene in modo uniforme nelle varie direzioni, a differenza dei processi fisici che guidano i moti atmosferici;
- Necessità di un'alta densità di stazioni, in particolare per le precipitazioni;
- Ridotta rappresentatività nelle zone coperte da pochi sensori;
- Copertura della sola terraferma;
- Scala temporale spesso limitata a quella giornaliera, in quanto i dati storici disponibili hanno sovente questa aggregazione;
- Produzione di griglie a risoluzione spaziale non particolarmente elevate (10-25 km);
- Domini geografici limitati al livello nazionale od anche regionale, per le restrizioni o le differenze operate dai Paesi vicini e, in Italia, dai diversi enti che forniscono dati a livello locale.

3.2. *DATASET* AVULSI DA OSSERVAZIONI *IN SITU*

3.2.1. *Hindcast* o *Historical re-forecast*

In oceanografia e meteorologia, con il termine di *Hindcast* o *Historical re-forecast* ci si riferisce usualmente al prodotto di un modello numerico di simulazione atmosferica relativo ad un particolare periodo storico durante il quale nessuna osservazione è stata assimilata. In altri termini, si tratta della riesecuzione di corse modellistiche previsionali su di un particolare periodo del passato. L'elemento che rende questo prodotto diverso dalla rianalisi è la limitatezza delle osservazioni, che vengono impiegate, peraltro, nella sola fase di inizializzazione del modello; viene quindi meno il loro ruolo guida, cioè quello di correggere e guidare l'elaborazione, riconducendola costantemente ad un t_o che corrisponde alla situazione misurata, la più reale possibile.

Applicabilità

- Miglior conoscenza della climatologia del modello, cioè del suo comportamento, per una interpretazione più acconcia delle previsioni sviluppate in fase operativa;
- Disponibilità dei dati di *output* su griglie regolari complete sia in senso spaziale che temporale;
- Distribuzione delle informazioni sulla griglia secondo i processi fisici che regolano i moti atmosferici, a differenza dei *dataset* derivati dalla mera interpolazione dei dati delle stazioni.

Limitazioni

- Le derive del modello, cioè la limitata aderenza con quanto effettivamente osservato. In caso di fenomeni caratterizzati da scale spazio-temporali ridotte (es precipitazioni convettive) il modello può simulare eventi anche molto diversi da quelli accaduti. La coerenza con la realtà è scarsa sia sul dato giornaliero che su quello di lungo periodo, poiché non vengono effettuate correzioni a livello statistico, ad esempio con tecniche MOS[21];
- Esigenza di risorse computazionali notevoli per analisi su ampie finestre temporali e per risoluzioni spaziali elevate.

3.2.2. Dati dall'archivio di output dei modelli previsionali

Un prodotto simile all'*Hindcast* è rappresentato dall'archivio degli *output* di modelli previsionali operativi, che consiste nella semplice archiviazione dei prodotti di *output* previsionali durante il loro periodo di operatività. In quella finestra temporale, più o meno lunga, il *setup* modellistico è oggetto di modifiche; si tratta principalmente di aggiornamenti *software* che vanno a migliorare le *performance* previsionali. In ciò consiste appunto la differenza fra questo prodotto, che è stato oggetto di modifiche che possono avere un impatto migliorativo sull'*output* del modello, ed il prodotto dell'*Hindcast*, nel quale il modello viene rieseguito in una configurazione prestabilita.

Applicabilità

- La generazione del *dataset* non richiede risorse computazionali aggiuntive rispetto a quelle messe in campo per il modello previsionale operativo; in sostanza il *dataset* si completa da solo, pur nel corso degli anni.

Limitazioni

- Le derive del modello: come per l'H*indcast*, il *dataset* presenta una coerenza limitata con quanto effettivamente osservato;
- Disomogeneità: trattandosi della semplice archiviazione degli *output* previsionali elaborati nel corso dell'operatività del modello, i suoi nuovi *setup,* quale la risoluzione spaziale della griglia di calcolo, causeranno disomogeneità spazio-temporali anche rilevanti.

3.3. DATASET DA OSSERVAZIONI INDIRETTE E/O REMOTE

3.3.1. Dati da satelliti

Sebbene l'utilizzo del satellite sia una pratica consolidata da diversi decenni, solo in tempi più recenti il notevole aumento di sensori e di orbite ne ha incrementato la fruibilità. I satelliti impiegati in meteorologia si dividono in due categorie: polari e geostazionari. I primi compiono orbite che transitano in prossimità dei poli ed intersecano quasi perpendicolarmente l'equatore; il loro periodo di rivoluzione è dell'ordine dei 100 minuti. L'orbita dei secondi è circolare, posizionata al di sopra dell'equatore e con un periodo di rivoluzione di 24 ore; essi, quindi, "inquadrano" sempre la stessa porzione di globo, muovendosi assieme ad esso. Le osservazioni satellitari utilizzano i diversi canali dello spettro elettromagnetico, in particolare l'infrarosso ed il visibile, per ottenere la rilevazione di alcune variabili meteorologiche attraverso misurazioni indirette.

Applicabilità

- Copertura totale, anche a prescindere da altre fonti di dati meteo; questo vantaggio si enfatizza per i settori del globo poco monitorati, come i Paesi più poveri, le zone remote, i deserti, gli oceani;
- Acquisizione di variabili meteorologiche quali la copertura nuvolosa, la temperatura, le precipitazioni e la velocità del vento;
- Acquisizione di variabili specifiche altrimenti difficilmente misurabili, come la temperatura del top delle nubi, informazione significativa nel monitoraggio dei sistemi temporaleschi severi, od il contenuto di vapore acqueo;
- Acquisizione immediata dei dati su larga scala.

Limitazioni

- Continuità temporale dei *dataset* legata alla frequenza di passaggio dei satelliti polari; il problema è in parte risolto dall'aumento del loro numero, alcune applicazioni ne vengono comunque limitate;
- Incertezza significativa delle misure, in quanto stimate in modo indiretto (es. *scattering* della luce per la misura della velocità del vento); per alcuni *dataset*, come nel caso delle precipitazioni, l'incertezza viene parzialmente mitigata da operazioni di correzione/taratura operate con altri sensori, come i radar meteorologici od i pluviometri; ciò è possibile solo nelle aree in cui questi sensori sono presenti, ed inoltre viene normalmente realizzata con l'impiego di un numero limitato di sensori al suolo;
- Disponibilità geografica parziale di alcune misure, come quella del vento che è limitata agli oceani;
- Interferenza della copertura nuvolosa, delle precipitazioni, di concentrazioni particolari di vapore acqueo; si tratta di fattori che influiscono negativamente sia sull'incertezza della misura che sulla continuità del dato; nei casi limite queste condizioni possono portare alla perdita della misurazione,
- Risoluzione spaziale medio-bassa, al massimo 10-25 km;
- Profondità storica limitata: i *dataset* raccolti con le tecnologie più recenti non superano i 5 anni. Quelli dotati di maggiore profondità storica soffrono frequentemente di disomogeneità temporali a causa

dell'aggiornamento della strumentazione nel corso degli anni e quindi dall'impiego iniziale di tecnologie superate;
- Carattere sperimentale; molte delle tecnologie impiegate sono oggetto di sperimentazione e di ricerca, presentano quindi dei limiti sul piano operativo, o sulla possibilità di ottenere servizi con continuità ed efficienza.

3.3.2. Dati da radar meteorologici

Il radar meteorologico viene utilizzato per il monitoraggio in tempo reale dei sistemi precipitativi presenti all'interno del proprio raggio d'azione, che per i radar in banda C è generalmente dell'ordine dei 100-200 km. Il principio di funzionamento si basa sull'interazione tra la radiazione elettromagnetica emessa dallo strumento, caratterizzata da una lunghezza d'onda compatibile con la dimensione tipica delle idrometeore, ed i sistemi precipitativi presenti in atmosfera (pioggia, grandine, neve). In base all'intensità del segnale di ritorno all'antenna ed al tempo intercorso tra emissione della radiazione e la sua ricezione, lo strumento stima, con una buona precisione, l'intensità e la posizione geografica dei fenomeni precipitativi. Dalla WMO[4] viene considerato uno strumento non-convenzionale, in quanto la sua diffusione non è estesa a tutti i Paesi, ma ciò non ne inficia l'utilità poiché si tratta di uno strumento fondamentale nelle applicazioni operative, sia per ottenere una cognizione estremamente chiara e sintetica delle perturbazioni nel tempo reale, che per tracciarne l'imminente evoluzione (*now casting*). Il radar apporta un contributo significativo anche in termini di rianalisi dei campi di precipitazione.

Applicabilità
- L'elevata risoluzione spazio-temporale che caratterizza il dato radar consente la rilevazione adeguata di fenomeni precipitativi molto localizzati ed intensi che spesso sfuggono alle reti convenzionali di pluviometri. È quindi in grado di fornire una visione piuttosto precisa della variabilità spaziale del campo precipitativo che, nel caso di fenomeni convettivi, può essere molto spinta e poco rappresentabile con altri sistemi di misura.
- Costituisce un'importante fonte di misure di precipitazione per zone sprovviste di pluviometri.

Limitazioni
- La precipitazione è stimata sulla base di una misura indiretta (*scattering* della radiazione emessa dall'antenna), pertanto l'incertezza può risultare significativa;
- Sull'incertezza, sull'omogeneità spaziale della misura e sull'area di copertura, influiscono negativamente alcuni fattori come la presenza di rilievi orografici, i disturbi del segnale generati da altri sistemi di telecomunicazione e la stessa intensità dei fenomeni. Sebbene esistano tecniche che consentono di mitigare alcuni di quegli effetti, in alcuni casi essi possono portare ad un deterioramento significativo della qualità della misura, generando forti sottostime o sovrastime. Gli stessi sistemi precipitativi, se particolarmente intensi, possono generare effetti di attenuazione del segnale radar e causare una sottostima dei fenomeni che si trovano "in ombra" rispetto al campo visivo del sensore. La presenza di fenomeni grandinigeni può portare ad una sovrastima della misura della precipitazione in quanto restituiscono all'antenna radar un segnale più intenso rispetto alle altre idrometeore, a parità di contenuto di acqua; situazione diametralmente opposta si ha in presenza di precipitazioni a carattere nevoso.
- Il radar fornisce la misura della precipitazione captata ad una certa quota, la quale può essere quantitativamente differente da quella che cade effettivamente al suolo;

- L'installazione delle reti radar ha generalmente avuto luogo per attività di monitoraggio in tempo reale e per scopi di protezione civile. Quindi, l'utilizzo del dato radar per la generazione di *dataset* di precipitazione ha applicazione relativamente recente e profondità storica limitata. I *dataset* che hanno profondità storiche più elevate soffrono spesso di disomogeneità temporali dovute all'aggiornamento tecnologico dei sensori;
- Le misure radar sono disponibili solamente sulla terraferma e sulle zone marine ad essa prospicenti,
- L'elevato costo di acquisizione e manutenzione delle reti radar può risultare un ostacolo alla diffusione di questa tecnologia, che rimane ancora piuttosto limitata ai Paesi più sviluppati;
- La disomogeneità della strumentazione utilizzata tra un Paese e l'altro, e a volte anche all'interno dello stesso Paese, può causare una difficoltà nella produzione di *dataset* omogenei.

4. CASE STUDY

4.1. VALUTAZIONE DELLE *PERFORMANCE* DI ALCUNE TIPOLOGIE DI *DATASET*

4.1.1. La precipitazione

Tra le variabili meteorologiche di maggior rilevanza, certamente la precipitazione si colloca in una posizione di assoluta preminenza. Va sottolineato che la sua importanza è pari alla sua difficoltà di monitoraggio, previsione e ricostruzione storica. Ciò va ascritto alla forte disomogeneità spazio-temporale che spesso la caratterizza, direttamente connessa alla notevole complessità dei processi fisici e microfisici legati alla sua generazione.
In uno schema estremamente semplificato, ma piuttosto diffuso, le precipitazioni possono essere divise in due grandi gruppi:

- Stratiformi;
- convettive.

Come sempre, in meteorologia non esistono compartimenti stagni e ci possono benissimo essere strutture convettive inserite in precipitazioni stratiformi. Va subito detto che la prima fattispecie è caratterizzata da una estensione areale anche consistente e da una relativa omogeneità spaziale; tali caratteristiche ne rendono relativamente agevole l'analisi *ex-post*. Completamente diverso il quadro della precipitazione convettiva, talvolta caratterizzata da estrema localizzazione; in particolari condizioni i valori di precipitazione che possono interessare un'area ristretta possono risultare molto elevati, mentre in aree contigue le piogge possono risultare scarse o addirittura assenti.

La metodologia
Allo scopo di valutare le *performance* dei diversi metodi elaborativi, si sono confrontati su di un unico *case-study* i vari *dataset* risultanti. Si tratta di un evento precipitativo caratterizzato da apporti meteorici su gran parte del Paese, con prevalenza di fenomeni connettivi. Si è considerata la precipitazione totale (24 ore) relativa al 21 Settembre 2020. Si sono quindi individuate 64 stazioni di riferimento[30] (*Fig. 9*) dotate di pluviometro, per ognuna delle quali si è provveduto a confrontare:

- il dato misurato con il dato estratto dal punto di griglia del *dataset* in corrispondenza della stazione di controllo, per i *dataset* costituiti da griglie;
- il dato misurato con il dato rilevato dalla stazione *in situ* più vicina, per il *dataset* realizzato con questo metodo, e quindi non strutturato in griglia (quindi solamente il primo dell'elencazione dei *dataset*).

I dati delle stazioni non sono stati poi utilizzati per la costruzione dei *dataset*, quindi essi hanno costituito il campione di controllo indipendente; il confronto quantitativo è stato eseguito utilizzando le metriche standard descritte più avanti.

Fig. 9 Le 64 stazioni di riferimento utilizzate per il confronto delle performance dei diversi dataset nel parametro "precipitazione"

I *dataset*

I *dataset* specifici utilizzati per il *case-study* sono stati i seguenti:

- Dati pluviometrici giornalieri da stazioni *in situ*, così come misurati: *dataset* costituito dai dati delle precipitazioni misurate dalle stazioni più vicine alle 64 stazioni di riferimento[30]. In altri termini, per ciascuna di quelle stazioni si è individuata la stazione pluviometrica più vicina, i cui dati misurati sono stati utilizzati per la costruzione del *dataset*. Questo *dataset* "simula" il metodo di impiegare il dato della stazione più vicina per ricostruire un evento meteorologico in una particolare località.
- Griglia di dati pluviometrici giornalieri interpolati da stazioni *in situ*: *dataset* costituito dall'interpolazione dei dati dei pluviometri di circa 4000 stazioni *in situ*[30] che rientrano in almeno una delle seguenti categorie: certificate, a norma WMO[4] ed ufficiali. In quelle stazioni non sono presenti le 64 di riferimento. Il dato è riportato su griglia regolare a 1 km di risoluzione.
- Griglia di dati pluviometrici giornalieri dall'archivio di *output* dei modelli previsionali: *dataset* costituito da una griglia regolare a 1 km di risoluzione che riporta i valori pluviometrici simulati:
  - dalla corsa previsionale del modello WRF[31] (inizializzato con i dati ICON[32] ed implementato da Radarmeteo[22]) effettuata alle ore 00z del 21 settembre 2020 per le prime 12 ore;
  - dalla corsa previsionale dello stesso modello effettuata alle ore 12z del 21 settembre 2020 per le seconde 12 ore.

- Griglia di dati pluviometrici giornalieri ricostruita dalle rilevazioni satellitari: *dataset* costituito dalla precipitazione giornaliera fornita dal *dataset* IMERG[33] riportata su griglia regolare a 1 km di risoluzione (*downscaling* dalla risoluzione nativa di 0.1°).
- Griglia di dati pluviometrici giornalieri ricostruita dalle rilevazioni radar: *dataset* costituito dalla precipitazione giornaliera ricavata dalle sole rilevazioni del mosaico radar nazionale e riportata su griglia a 1 km di risoluzione spaziale.
- Griglia di dati pluviometrici giornalieri ricostruita dalla integrazione radar e pluviometri (RainGis®): *dataset* costituito dalla precipitazione giornaliera ricavata dall'integrazione di dati da stazione e dati radar effettuata dall'algoritmo RainGis® e riportata su griglia regolare a 1 km di risoluzione spaziale. Questo è il metodo sviluppato ed utilizzato operativamente da Radarmeteo[22] per l'elaborazione del campo di precipitazione in *post-processing*, nell'ambito del *dataset* di rianalisi.

In *Fig. 10* sono riportate le mappe ricostruite a partire dai *dataset* basati su griglia (quindi tutti ad esclusione del primo, in quanto basato sui dati delle stazioni *in situ*), con l'obiettivo di evidenziare come lo stesso evento precipitativo sia rappresentato in modo diverso dalle diverse metodologie.

Le verifiche

Per la verifica quantitativa delle *performance* dei *dataset*, si è proceduto con un confronto tra i valori di precipitazione misurati dalle 64 stazioni incognite[30] ed i valori restituiti dai diversi *dataset* nel punto di griglia più vicino alla stazione di controllo.
L'analisi si è basata sulle seguenti metriche:

- Coefficiente di determinazione (R^2): fornisce una stima della capacità del *dataset* di fornire valori vicini a quelli misurati. Il valore di R^2 varia da 0 a 1: valori vicino a 1 indicano che il *dataset* approssima molto bene i valori misurati dalle 64 stazioni di controllo;
- MAE – *Mean Absolute Error*: fornisce la media degli errori assoluti. Più il valore dell'indice è basso, più il *dataset* è in grado di stimare accuratamente la precipitazione caduta nei punti incogniti, R;
- MSE – *Root Mean Squared Error*: fornisce la radice dell'errore quadratico medio. Come il MAE, fornisce una stima dell'errore medio, enfatizzando gli errori più macroscopici grazie al termine quadratico. Valori bassi dell'indice indicano una buona *performance* del *dataset*.

Per ottenere ulteriori metriche di analisi, è stata elaborata la tabella di contingenza per 4 soglie precipitative di riferimento (1 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm). La tabella di contingenza consente di ottenere 4 casistiche di combinazione tra dato osservato e dato fornito dal *dataset* analizzato:

- Hit: il *dataset* e la stazione di misura vedono entrambi un valore uguale o superiore alla soglia di riferimento;
- Correct Negative: il *dataset* e la stazione di misura vedono entrambi un valore minore alla soglia di riferimento;
- Miss: il *dataset* vede un valore inferiore alla soglia di riferimento, mentre il dato misurato è uguale o superiore (quindi il *dataset* ha sottostimato l'evento);
- False alarm: il *dataset* vede un valore uguale o superiore alla soglia di riferimento, mentre il dato misurato è inferiore (quindi il *dataset* ha sovrastimato l'evento).

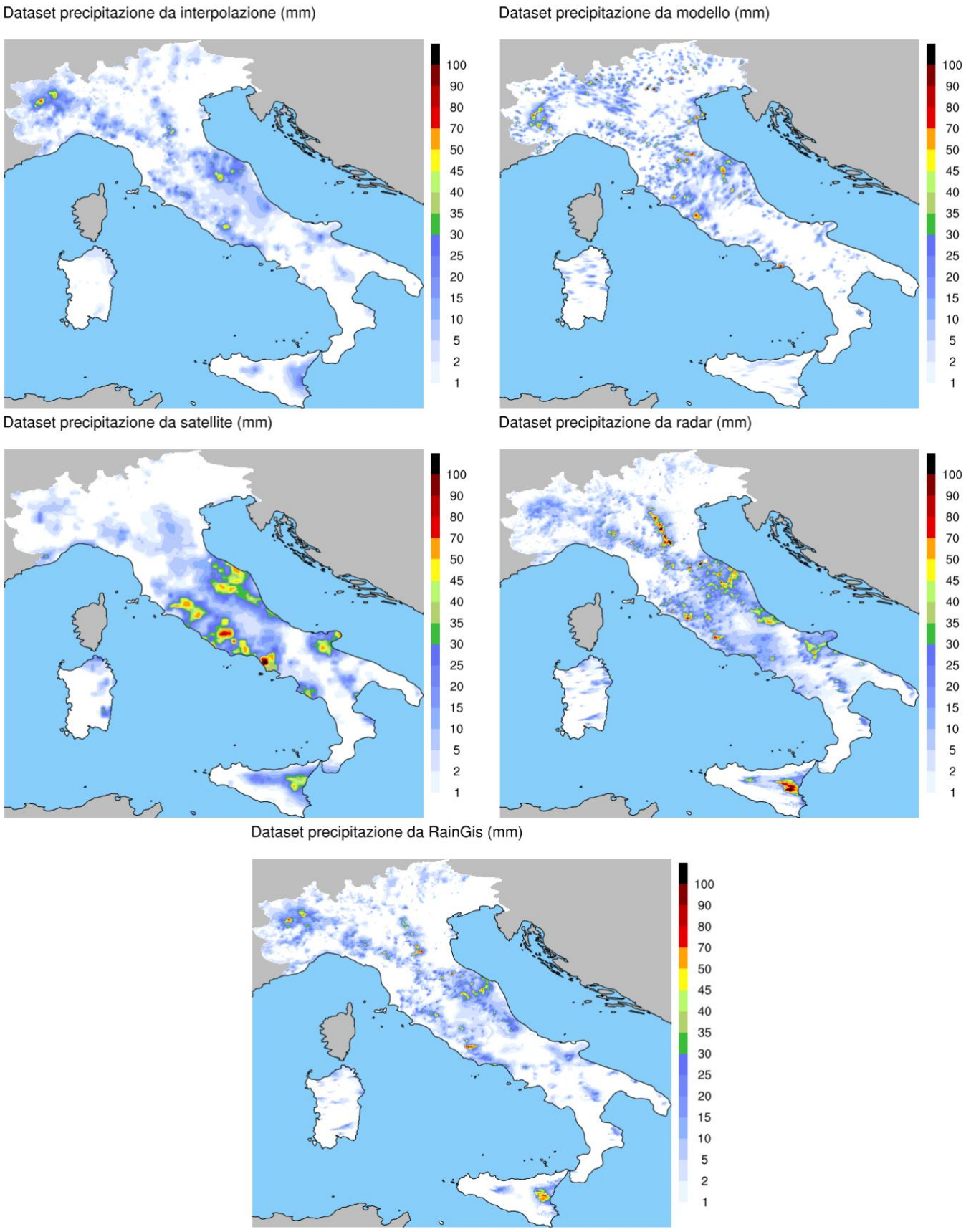

Fig. 10 Precipitazioni giornaliere del 21/09/2020 ricostruite nei diversi dataset

Le metriche statistiche che si sono ottenute dai risultati della tabella di contingenza, e che hanno consentito un'ulteriore analisi delle *performance* dei *dataset*, sono le seguenti:

- ETS – *Equitable threat score* (*Gilbert skill score*): fornisce una misura degli eventi correttamente rappresentati dal *dataset*;
- FAR – *False Alarm Rate*: fornisce una misura di quanto il *dataset* restituisca stime precipitative superiori alla soglia di riferimento rapportata al numero di stime corrette;
- FBIAS – *Frequency BIAS*: restituisce una stima sulla tendenza del *dataset* a sovrastimare (valori >1) o sottostimare gli eventi (valori tra 0 e 1).

In linea teorica, un *dataset* senza errori sarebbe caratterizzato da:

ETS=1
FAR=0
FBIAS=1.

I risultati ottenuti sono riportati in *Fig. 11*.

Considerazioni finali

Il *dataset* ricavato dall'algoritmo RainGis®, elaborato da Radarmeteo[22], che integra le osservazioni dei pluviometri con quelle radar, mostra la miglior *performance* in tutte le metriche utilizzate. Parte di questa *performance* è spiegabile con la buona correlazione che mostra il *dataset* con i dati precipitativi ricavati dalle sole misure radar: questo ultimo *dataset*, infatti, costituisce uno dei dati di input dell'algoritmo e, sebbene il suo errore non sia trascurabile (RMSE >10 mm), esso mostra un discreto coefficiente di determinazione (R^2 pari a 0.63) e buoni risultati nelle metriche della tabella di contingenza, in genere secondo solo al *database* ricavato dall'algoritmo RainGis®. Ciò va ascritto presumibilmente alla grande capacità del radar di "intercettare" la forte discontinuità spaziale della precipitazione convettiva.

I *dataset* costituiti dai dati delle stazioni più vicine e dai dati interpolati presentano risultati simili, tendenzialmente a favore dei dati interpolati, e si collocano a metà nella classifica di *performance* dei vari *dataset*.

Il *dataset* costituito dalle rilevazioni satellitari presenta errori rilevanti e *performance* piuttosto scarse nelle metriche derivate dalla tabella di contingenza.

Il *dataset* costituito da dati modellistici di archivio risulta essere il meno performante tra quelli analizzati: il coefficiente di determinazione e l'indice ETS, molto vicini a zero, mostrano come i dati siano molto poco correlati con le misurazioni di controllo. Questa situazione si presenta in particolar modo per i fenomeni convettivi, che vengono adeguatamente simulati a livello di macroscala, ma non sempre individuati con accuratezza a livello locale.

A titolo di esempio, si fornisce la rappresentazione del campo precipitativo visto dai diversi *dataset* nella zona della provincia di Torino per l'evento del 21 settembre 2020. Esso viene indicato utilizzando una scala cromatica (dal giallo al viola) sovrapposta ai valori di precipitazione totale giornaliera registrata dai pluviometri dell'area (valori puntuali numerici). Lo scopo è quello di mettere a confronto i diversi gradi di coerenza tra i dati ricavati dai diversi *dataset* rispetto a quanto effettivamente osservato nell'evento.

Fig. 11 Grafici delle metriche di verifica dei diversi dataset. Per ciascuna metrica si evidenzia il valore rappresentativo della miglior performance.

Legenda:

a. *PREC_NEAR: dati pluviometrici da stazione in situ, così come misurati;*
b. *PREC_INT: griglia di dati pluviometrici da stazione in situ interpolati;*
c. *PREC_MOD: griglia di dati pluviometrici dall'archivio di output dei modelli previsionali;*
d. *PREC_SAT: griglia di dati pluviometrici ricostruita dalle rilevazioni satellitari;*
e. *PREC_RAD: griglia di dati pluviometrici ricostruita dalle rilevazioni radar;*
f. *PREC_REA: griglia di dati pluviometrici ricostruita dalla integrazione radar e pluviometri (RainGis®).*

Dal confronto dei campi di precipitazione rappresentati dai diversi *dataset* nell'area del torinese, si osserva quanto segue:

- Il *dataset* ottenuto da dati interpolati (*Fig. 12*) segue in maniera pedissequa i valori rilevati dai pluviometri, essendo ricavato dall'interpolazione degli stessi. Tuttavia, il metodo impiegato non è in grado di rilevare eventi o caratteristiche del campo di precipitazione non rilevati dai pluviometri: in altri termini, il metodo di interpolazione "riempie" lo spazio tra un pluviometro e l'altro in maniera isotropica e graduale partendo dai soli valori puntuali conosciuti. Il campo non può evidenziare, per esempio, picchi dovuti alla fenomenologia temporalesca non intercettata dai pluviometri: questo è un punto particolarmente negativo in un contesto di precipitazioni convettive e localizzate come quello analizzato.
- Il *dataset* ottenuto da dati modellistici (*Fig. 13*) mostra una correlazione molto bassa con i dati misurati al suolo: i picchi precipitativi vengono posizionati più a sud rispetto a quanto verificatosi in realtà, portando ad una generale sottostima delle precipitazioni nelle zone in cui è piovuto e ad una sovrastima nelle zone in cui le precipitazioni sono risultate scarse o nulle.
- Il *dataset* ottenuto dalle rilevazioni satellitari (*Fig. 14*) mostra una generale ed evidente sottostima dei valori precipitativi, sebbene la correlazione spaziale sia leggermente migliore rispetto al *dataset* modellistico.
- Il *dataset* ottenuto dai soli dati radar (*Fig. 15*) mostra un'ottima correlazione spaziale con i pluviometri, sebbene presenti, almeno in questo caso, una generale sottostima dei valori. Al contrario del *dataset* ottenuto dall'interpolazione dei dati dei pluviometri, esso è in grado di individuare eventi localizzati e caratteristiche locali del campo delle precipitazioni.
- Il *dataset* ottenuto dall'algoritmo RainGis® (*Fig. 16*), che integra il *dataset* radar con i dati pluviometrici, fornisce un campo precipitativo che è in grado di evidenziare eventi localizzati, grazie alla misura radar, e quantitativamente più accurato, grazie all'operazione di taratura effettuata dai pluviometri. Esso presenta, quindi, un ottimo grado di correlazione spaziale e stime quantitativamente meno discordanti con i dati delle stazioni *in situ*.

Se dall'analisi meteorologica *ex-post* si passa a quella climatologica, specie se pluridecennale, è logico attendersi in generale risultati meno diversificati, sebbene la fortissima disomogeneità spaziale, dovuta alla componente convettiva, potrebbe continuare ad incidere in termini significativi sul grado di incertezza, in particolare utilizzando i *dataset* di matrice puramente modellistica come *hindcast* o *historical re-forecast*, che sono risultati i meno performanti.

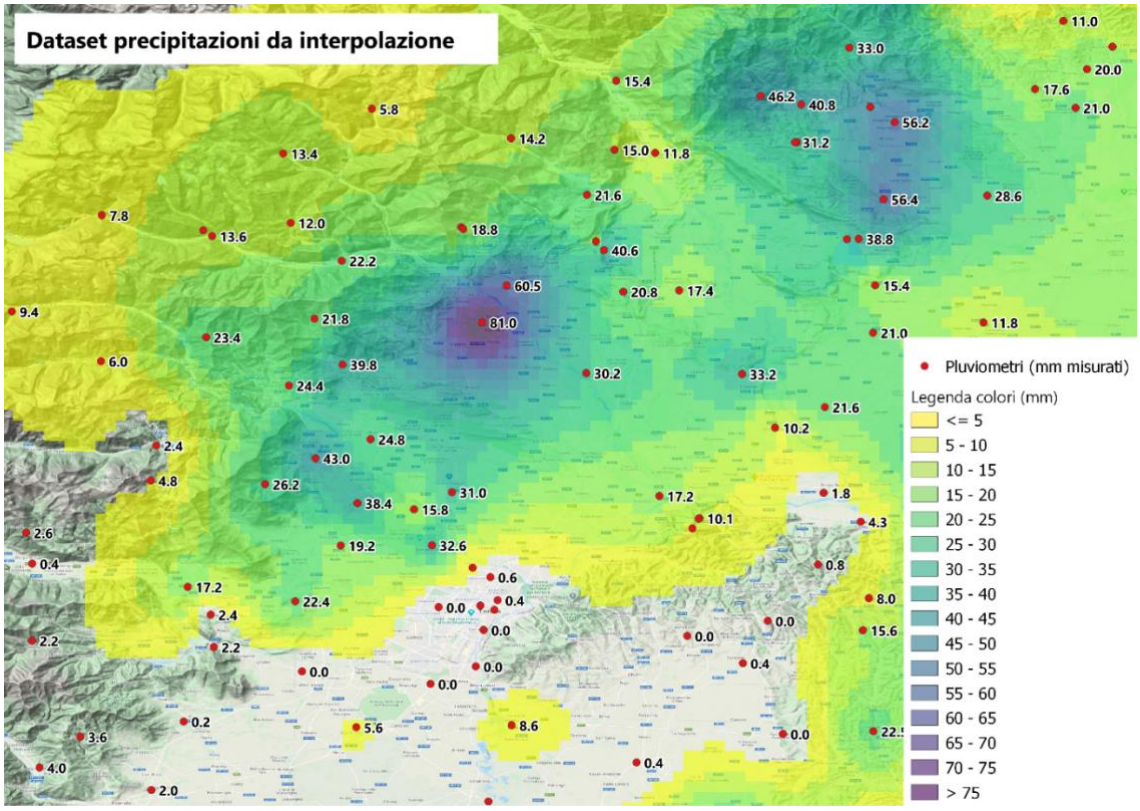

Fig. 12 Mappa del campo di precipitazione ricavato dal dataset di dati interpolati da stazioni in situ sovrapposto ai dati puntuali dei pluviometri.

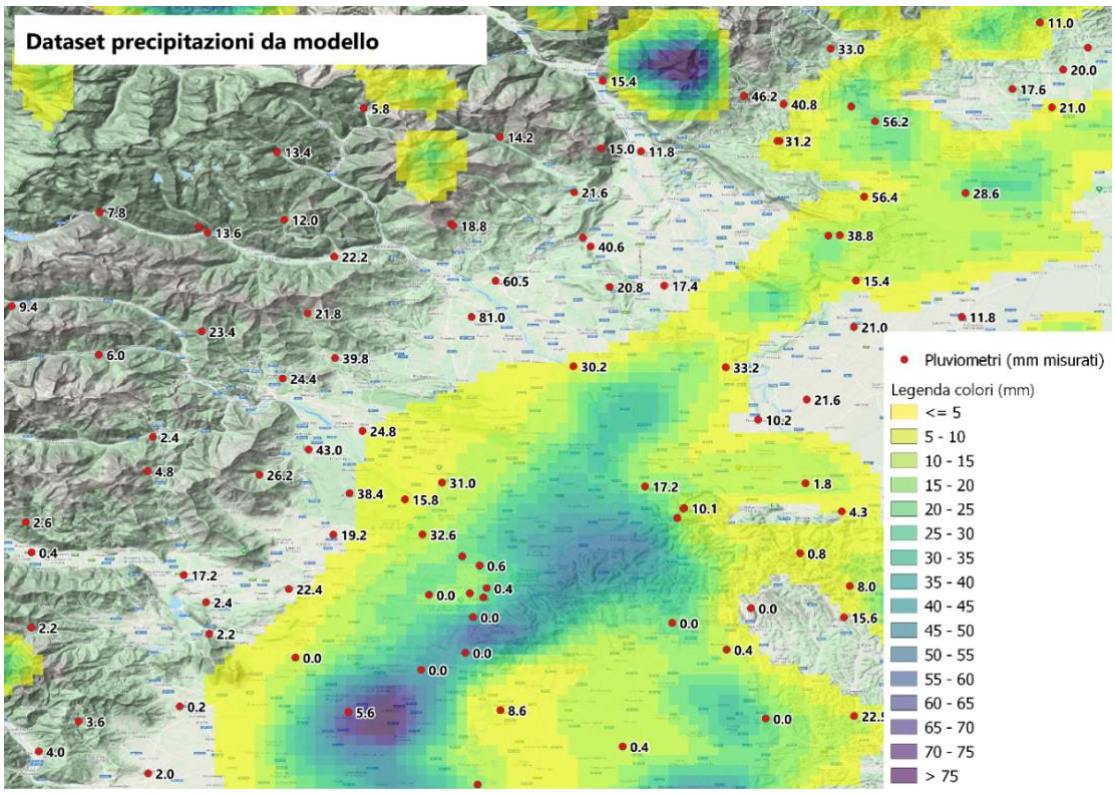

Fig. 13 Mappa del campo di precipitazione ricavato dal dataset dell'archivio di output dei modelli previsionali sovrapposto ai dati puntuali dei pluviometri

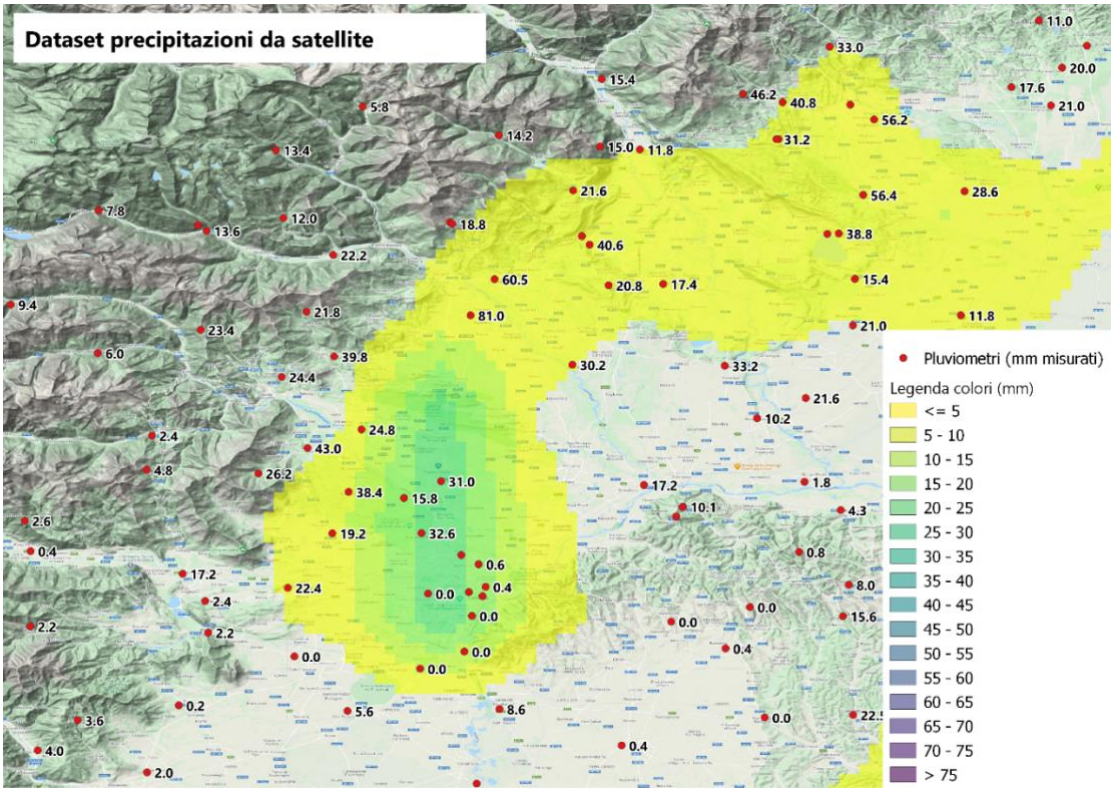

Fig. 14 Mappa del campo di precipitazione ricavato dal dataset di dati satellitari sovrapposto ai dati puntuali dei pluviometri

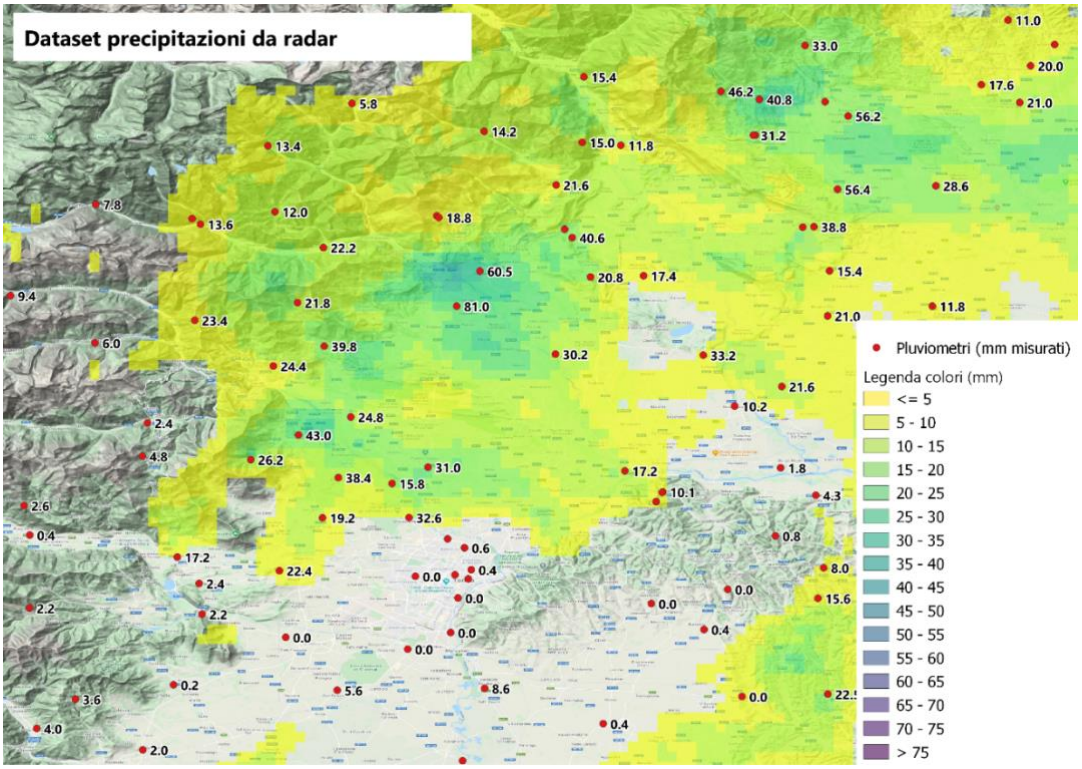

Fig. 15 Mappa del campo di precipitazione ricavato dal dataset di dati radar sovrapposto ai dati puntuali dei pluviometri

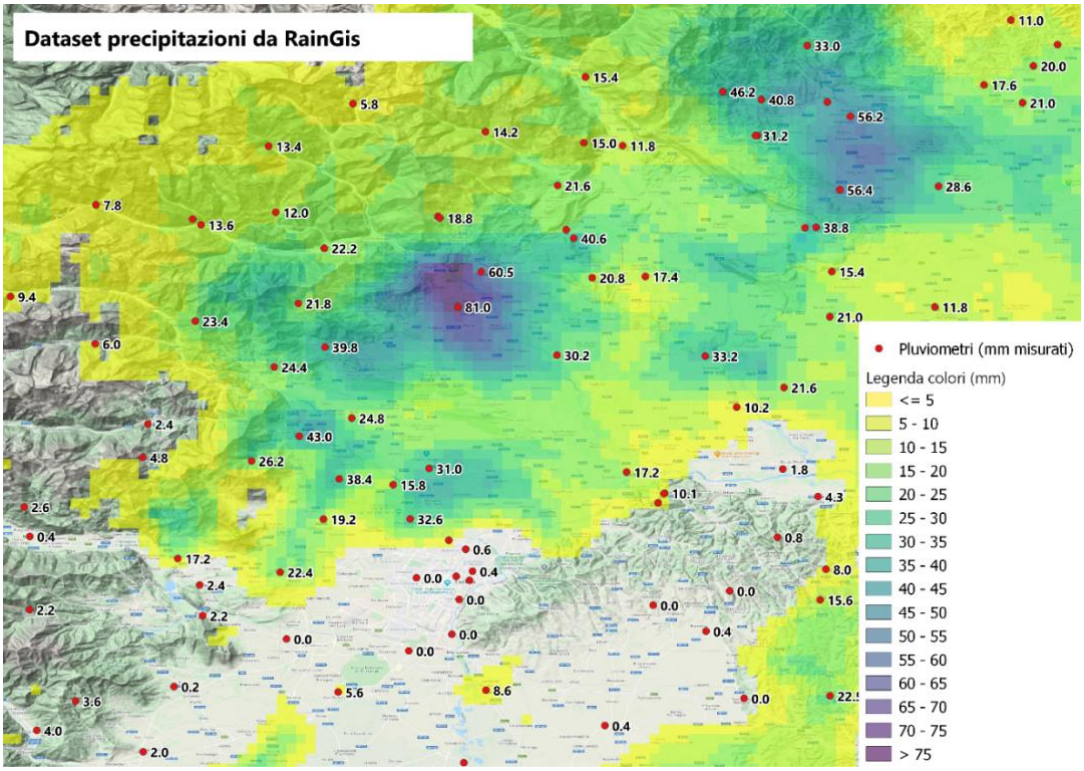

Fig. 16 Mappa del campo di precipitazione ricavato da integrazione radar e pluviometri (RainGis®) sovrapposto ai dati puntuali dei pluviometri

4.1.2. La temperatura

La variabilità spaziale della temperatura, specie in aree ad orografia non particolarmente complessa, è certamente meno rilevante di quella della precipitazione; va anche detto che per questo parametro non esistono sistemi in remote sensing in grado di fornire informazioni ad elevata risoluzione spaziale, quali quelle desumibili dal radar meteorologico per la precipitazione.

La metodologia

Anche nel caso in oggetto, il confronto fra le *performance* di una serie di *dataset* di diversa natura è stato operato sulle 24 ore del 21 settembre 2020. Si sono individuate 93 stazioni di riferimento[30] (*Fig. 17*) dotate del sensore di temperatura a 2m dal suolo, per ognuna delle quali si è provveduto a confrontare:

- il dato misurato con il dato estratto dal punto di griglia del *dataset* in corrispondenza della stazione di controllo, per i *dataset* costituiti da griglie;
- il dato misurato con il dato rilevato dalla stazione *in situ* più vicina, per il *dataset* realizzato con questo metodo, e quindi non strutturato in griglia (quindi solamente il primo della successiva elencazione dei *dataset*).

I dati di queste stazioni non sono stati utilizzati per la costruzione dei *dataset*, quindi essi hanno costituito il campione di controllo indipendente. Il confronto quantitativo è stato eseguito utilizzando alcune metriche standard descritte più avanti.

Il parametro meteorologico di riferimento è la temperatura oraria osservata nelle 24 ore del 21 settembre 2020. La scelta della giornata per il *case study* è stata effettuata in coerenza con quello relativo alla precipitazione; essa è caratterizzata da condizioni di tempo instabile e perturbato, presenta andamenti orari della temperatura che si discostano dalla curva che si osserva nelle giornate stabili e soleggiate, la stessa varianza spaziale risulta più elevata rispetto alla norma. Questa situazione, quindi, costituisce un buon banco di prova per i diversi *dataset*.

I *dataset*

I *dataset* specifici utilizzati per il *case-study* sono stati i seguenti:

- Dati orari di temperatura a 2m di quota da stazione *in situ*, così come misurati: *dataset* costituito dai dati delle temperature orarie misurate dalle stazioni più vicine alle 93 stazioni di riferimento[30]. In altri termini, per ciascuna di quelle stazioni si è individuata la stazione termometrica più vicina e se ne sono utilizzati i dati misurati per la costruzione del *dataset*. Questo *dataset* simula il metodo di impiegare il dato della stazione più vicina per ricostruire un evento meteorologico in una particolare località.
- Griglia di dati orari di temperatura a 2m di quota interpolati da stazioni *in situ,* senza l'intervento di tecniche di regressione che tengano conto della variabile ausiliaria dell'altimetria del territorio: *dataset* costituito dall'interpolazione dei dati di temperatura di ca. 4000 stazioni *in situ*[30] costituenti il *DB* nazionale unificato, dalle quali sono state escluse le 93 stazioni di riferimento. Il dato è riportato su griglia regolare a 1 km di risoluzione.

Fig. 17 Le 93 stazioni di riferimento utilizzate per il confronto delle performance dei diversi dataset nel parametro "temperatura"

- Griglia di dati orari di temperatura a 2m di quota interpolati da stazioni *in situ*, con l'applicazione della regressione dovuta alla variabile ausiliaria dell'altitudine: come sopra. Questo *dataset* tiene conto dell'andamento verticale della temperatura per la ricostruzione del campo tramite DEM[20] a 1km di risoluzione spaziale.
- Griglia di dati orari di temperatura dall'archivio di *output* dei modelli previsionali: *dataset* costituito da una griglia regolare con 1 km di risoluzione che riporta i dati orari di temperatura simulati:
  - dalla corsa previsionale del modello WRF[31] (inizializzato con i dati ICON[32] ed implementato da Radarmeteo[22]) effettuata alle ore 00z del 21 settembre 2020 per le prime 12 ore;
  - dalla corsa previsionale del modello WRF[31] (inizializzato con i dati ICON[32] ed implementato da Radarmeteo[22]) effettuata alle ore 12z del 21 settembre 2020 per le seconde 12 ore.
- Griglia di dati orari di temperatura a 2m di quota ricostruita mediante rianalisi: *dataset* costituito dall'elaborazione tramite tecnica di rianalisi dei dati orari di temperatura di ca. 4000 stazioni *in situ*[30] che rientrano in almeno una delle seguenti categorie: certificate, a norma WMO[4] ed ufficiali. In quelle stazioni non sono presenti le 93 di riferimento. Il dato è riportato su griglia regolare a 1 km di risoluzione.

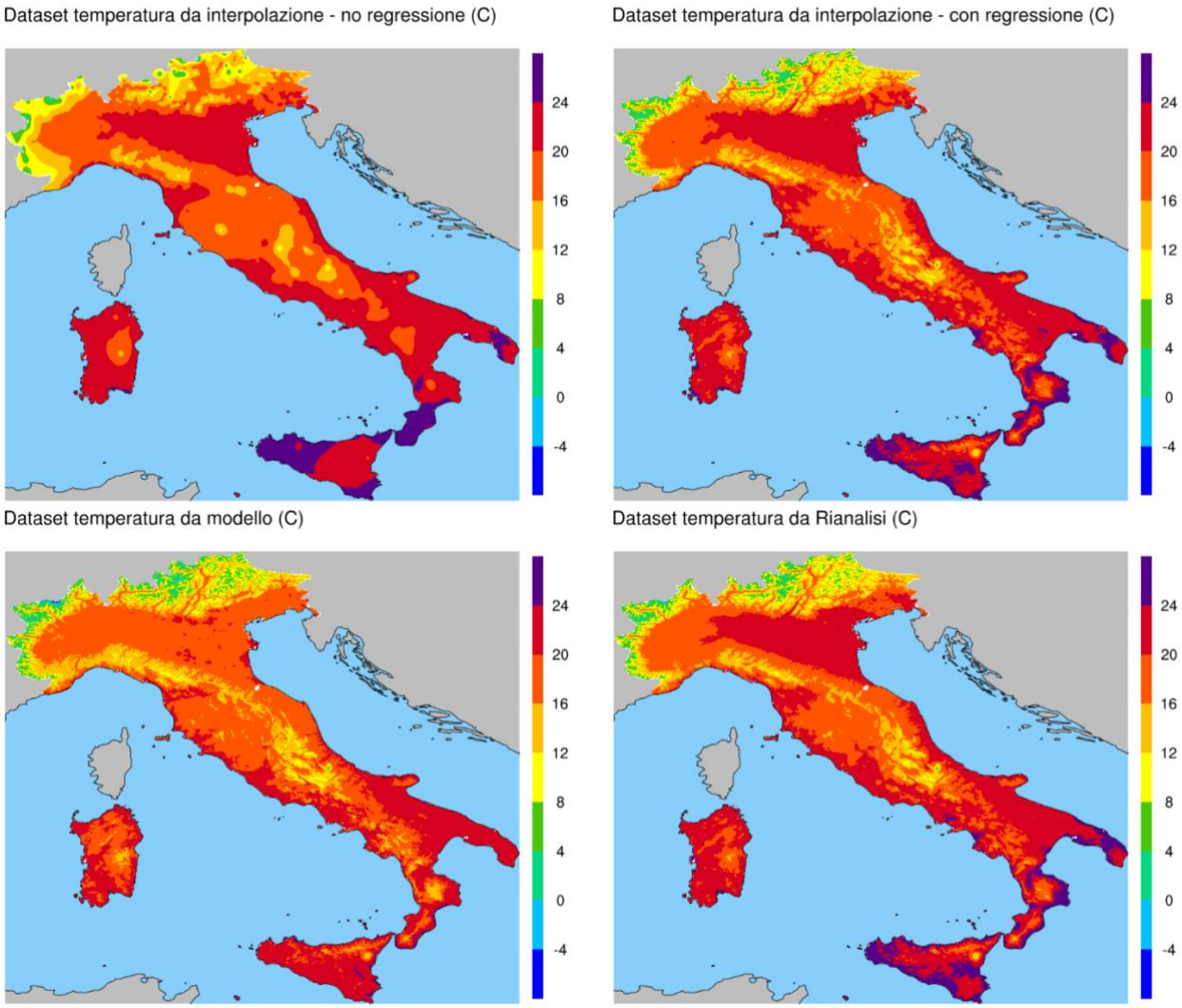

Fig. 18 Temperature medie giornaliere del 21/09/2020 ricostruite nei diversi dataset.

In *Fig. 18* sono riportate le mappe di temperatura media giornaliera ottenute dai diversi *dataset* basati su griglia (quindi tutti ad esclusione del primo, in quanto basato sui dati delle stazioni *in situ*). I diversi metodi producono campi diversi, ma le differenze sono meno tangibili rispetto a quelle emerse nelle precipitazioni; si può notare come il *dataset* di interpolazione che non utilizza la regressione con la variabile ausiliaria dell'altitudine fornisca una rappresentazione più approssimata dell'influenza dell'orografia su questo campo. In *Fig. 19* sono riportati i grafici di regressione che evidenziano il grado di accordo tra i *dataset* e le osservazioni. In linea teorica, un *dataset* che non presenta scostamenti rispetto alle osservazioni, sarebbe associato a un grafico costituito da punti perfettamente allineati alla retta di equazione y=x+0 e un R^2 pari a 1. Una maggiore dispersione dei punti del grafico e un valore minore di R^2 indicano una peggiore *performance* del *dataset*.

Le verifiche

Per la verifica quantitativa delle *performance* dei *dataset*, si è proceduto con un confronto tra i valori di temperatura oraria misurati dalle 93 stazioni incognite[30] e i valori restituiti dai diversi *dataset* nel punto di griglia più vicino alla stazione di controllo. L'analisi si è basata sulle seguenti metriche (i risultati ottenuti sono riportati in *Fig. 20):*

- Coefficiente di determinazione (R^2): fornisce una stima della capacità del *dataset* di fornire valori vicini a quelli misurati. Il valore di R^2 varia da 0 a 1: valori vicino a 1 indicano che il *dataset* approssima molto bene i valori misurati dalle 93 stazioni di controllo[30].
- MAE – *Mean Absolute Error*: fornisce la media degli errori assoluti. Più il valore dell'indice è basso, più il *dataset* è in grado di stimare accuratamente la temperatura oraria misurata nei punti incogniti.
- RMSE – *Root Mean Squared Error*: fornisce la radice dell'errore quadratico medio. Come il MAE, fornisce una stima dell'errore medio, enfatizzando gli errori più macroscopici grazie al termine quadratico. Valori bassi dell'indice indicano una buona *performance* del *dataset*.
- BIAS: restituisce una stima della distorsione statistica del *dataset*. Valori maggiori di 1 indicano che la metodologia utilizzata tende mediamente a sovrastimare, valori inferiori a 1 indicano una tendenza alla sottostima.

Considerazioni finali

Il *dataset* ottenuto tramite rianalisi mostra la miglior *performance* nelle metriche R^2 (0.962), MAE (0.8°C) e RMSE (1.0°C). La rianalisi presenta un leggero *bias* positivo, indicando una tendenza alla sovrastima del dato.
I *dataset* costituiti dai dati osservativi delle stazioni (T_NEAR, T_INT_NOREG, T_IN_REG) presentano risultati simili, ma mostrano una tendenza ad un miglioramento della *performance* all'aumentare della complessità dell'algoritmo.

Il metodo di analisi più semplice, quello che utilizza solamente i dati delle stazioni più vicine a quelle di controllo, presenta le incertezze più elevate (MAE 1.4°C).

Il *dataset* di pura interpolazione presenta un valore di incertezza intermedio (MAE 1.3°C).

Il *dataset* di interpolazione che applica la regressione con l'altitudine presenta l'errore più contenuto fra i tre (MAE 1.1°C).

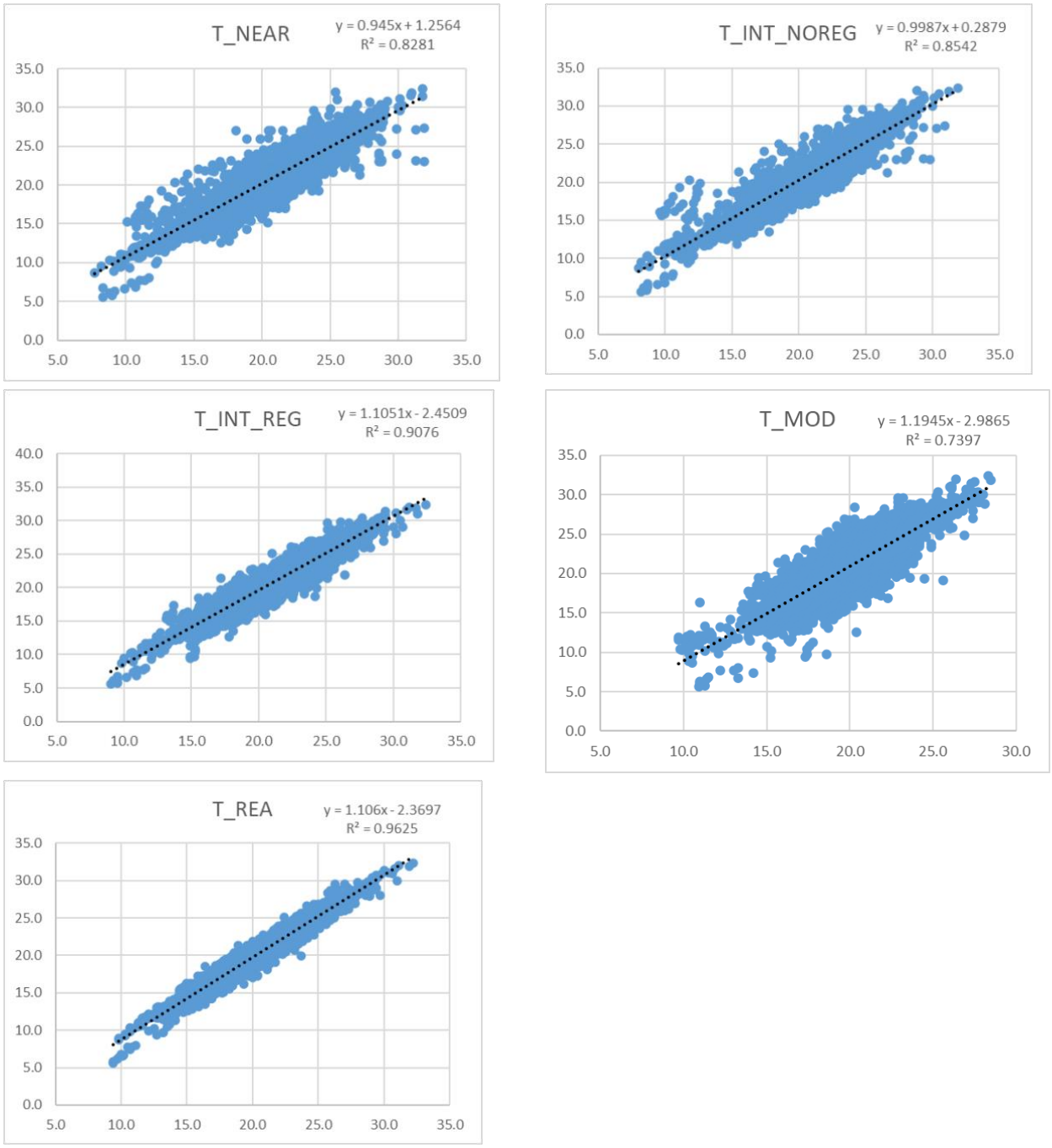

Fig. 19 Grafici di regressione dataset/osservazioni

Legenda:

a. *T_NEAR: dati orari di temperatura a 2m da stazione;*
b. *T_INT_NOREG: griglia di dati orari di temperatura a 2m da stazione interpolati senza la regressione con la variabile ausiliaria dell'altitudine;*
c. *T_INT_REG: griglia di dati orari di temperatura a 2m da stazione interpolati con la regressione con la variabile ausiliaria dell'altitudine;*
d. *T_MOD: griglia di dati orari di temperatura a 2m da archivio di previsioni modellistiche;*
e. *T_REA: griglia di dati orari di temperatura a 2m da rianalisi.*

Di interesse è il confronto del BIAS: esso mostra una sottostima nei primi due *dataset*, ed una sovrastima in quello in cui si è utilizzata la regressione con l'altitudine, indicando come questa tecnica migliori nel complesso la *performance* del *dataset* (errori più contenuti) ma tenda a invertire il segno dell'incertezza (da sottostima a sovrastima).

Il *dataset* costituito da dati modellistici di archivio risulta essere il meno performante fra quelli analizzati; l'errore è sensibilmente più elevato rispetto agli altri *dataset* (MAE 2.0°C, RMSE 2.5°C) e anche il BIAS mostra una evidente tendenza alla sottostima dei valori.

Fig. 20 Grafici delle metriche di verifica dei diversi dataset. Per ciascuna metrica si evidenzia il valore rappresentativo della miglior performance. Legenda: si veda figura precedente

4.2. POLIZZE PARAMETRICHE PER L'AGRICOLTURA BASATE SU *DATASET* DI RIANALISI AD ALTA RISOLUZIONE

L'Italia è senza dubbio, a livello mondiale, una delle prime Nazioni che abbia posto la gestione del rischio fra i fondamenti della propria politica agricola. Dagli anni '70 le imprese agricole italiane hanno la possibilità di assicurare la propria produzione vegetale con polizze multirischio (*multiperils*), per tutelarsi contro la perdita quanti-qualitativa di prodotto causata sia dalle avversità atmosferiche cosiddette "di frequenza", come la grandine, il vento forte, l'eccesso pioggia e gli sbalzi di temperatura, sia dagli eventi avversi, detti "catastrofali", che avvengono con più rarità ma che assumono carattere sistemico, come il gelo, la siccità e le alluvioni. Lo sviluppo e la diffusione di questi strumenti assicurativi di tutela del reddito sono stati favoriti da una serie di

misure di sostegno all'agricoltura, grazie alle quali le imprese del settore potevano ottenere un contributo pubblico a parziale rimborso del costo di polizza. La più recente normativa sulla PAC ha espressamente previsto il riconoscimento degli aiuti comunitari, oltre che per le polizze danni tradizionali, anche per polizze *index-based*, che hanno la caratteristica di coprire la perdita di produzione assicurata esclusivamente sulla base dell'andamento di indici biologici o meteo-climatici.

Quindi, oltre alle polizze tradizionali relative ai danni causati da specifici eventi meteorologici, è possibile utilizzare anche polizze che ristorano le conseguenze negative di un andamento climatico avverso. Quest'ultimo viene identificato sulla base dell'alterazione dei parametri meteorologici, quali ad esempio la piovosità e/o la temperatura nel periodo di coltivazione, nella misura in cui essi si discostano significativamente dalla curva ottimale per una determinata coltura in una determinata fase fenologica, producendo quindi effetti negativi sulla produzione, misurabili, se del caso, anche con indici biologici.

Un approccio molto strutturato verso questi temi è connaturato con la gestione del rischio in generale, in quanto essa richiede valutazioni ed *assessment* di lungo periodo, anche in un contesto storico e climatico di estremizzazione degli eventi e di conseguente fluidità degli assetti territoriali, ambientali ed economici. Questa esigenza di analisi profonda, ha dato luogo all'avvio di un ampio dibattito ed alla istituzione di *think tank* dedicati, cui hanno partecipato la comunità scientifica, i *provider* meteorologici, gli analisti, gli statistici, gli agronomi, al fine di analizzare nuovi modelli colturali e di simulare e stimare le rese produttive in funzione dei parametri meteorologici e delle variabili ad essi associate, con lo scopo di modernizzare la proposta assicurativa alla luce delle nuove evidenze scientifiche.

I gruppi di lavoro hanno identificato i *dataset* più efficaci per conseguire quei fini, sia in termini operativi che commerciali, nei seguenti:

- dati meteorologici storici (10 o più anni), al fine di fornire al modello colturale l'*input* necessario per simulare l'andamento passato delle colture e, quindi, di individuare gli indici più correlati allo sviluppo dei danni ed ottenere una adeguata calibrazione dei meccanismi della polizza,
- dati meteorologici in *near real-time* per l'aggiornamento continuo e quotidiano degli indici e dei parametri, al fine di fornire all'assicurato report periodici sull'andamento della propria polizza.

Un'altra scelta significativa è stata quella di utilizzare *dataset* di rianalisi ad alta risoluzione, per soddisfare due specifiche esigenze:

- elaborare indici quanto più accurati e rappresentativi di una realtà agricola, come quella italiana, caratterizzata da numero elevato di piccole imprese, da una grande varietà spaziale delle colture e da un'ampia variabilità microclimatica,
- stimare in modo accurato i parametri meteo di riferimento (temperatura, piovosità, ecc.) al fine di ottenere una simulazione dei danni alle colture il più possibile vicina alla realtà riscontrata in campo, obiettivo, questo, che può essere conseguito solamente utilizzando *dataset* che si basino su di un consistente impiego delle osservazioni come accade, per l'appunto, nella rianalisi.

L'utilizzo di *dataset* a bassa risoluzione porterebbe infatti alla individuazione di indici generici, che non sarebbero in grado di apprezzare l'estrema variabilità della matrice, risultando alla fine non correlati con l'andamento colturale puntuale osservato in campo. Un tale approccio restituirebbe un andamento medio su

larga scala, fornendo una stima di danni che potrebbe risultare sovrastimata per alcune colture e sottostimata per altre.

Le griglie di dati meteorologici ad alta risoluzione consentono, invece, di associare a ciascun appezzamento colturale una "stazione meteorologica virtuale". Una volta georeferenziata la partita assicurata, operazione che viene effettuata alla stipula della polizza, il sistema provvede ad assegnare il nodo della griglia più vicino e il relativo flusso di dati meteorologici storici e *near real-time*. L'alta risoluzione del *dataset*, che può raggiungere 1 km^2, consente di assegnare alle partite assicurate punti che, al più, sono distanti 500 m, fornendo quindi un dato meteorologico adeguatamente rappresentativo, e comunque accettato in termini di convenzionalità dello stesso.

Il risultato atteso, e sul quale si fonda il concetto stesso di polizza *index-based,* è che anche i danni alle colture simulati dal modello colturale sulla base dell'*input* fornito dalla "stazione meteorologica virtuale" presentino un quadro in linea con quanto avviene effettivamente in campo. In questo modo si giunge ad una completa automazione del funzionamento della polizza, che può essere sintetizzato nei seguenti passaggi:

- assimilazione del dato meteorologico giornaliero ed aggiornamento degli indici;
- verifica dei superamenti di soglia degli indici;
- nel caso si sia verificato un superamento di soglia, il modello, in base all'intensità di discostamento dell'indice dal suo andamento normale, calcola una percentuale di danno della partita assicurata;
- il danno cumulato viene aggiornato quotidianamente;
- al momento della raccolta, il danno cumulato viene convertito in danno economico e l'assicurazione procede ad indennizzare l'assicurato in modo automatico.

È grazie a queste caratteristiche che la polizza *index-based* desta grande interesse, in quanto il processo, completamente automatizzato, da un lato garantisce un abbattimento dei costi di assicurazione e dall'altro consente l'aggiornamento costante ed in piena trasparenza dello stato della polizza, garantendo un pagamento immediato e senza intermediazione al superamento dei parametri *trigger*.
È quindi fuor di dubbio che, nei prossimi anni, la polizza *index-based* andrà ad assumere un ruolo sempre maggiore nel paniere degli strumenti utilizzati per la gestione del rischio, ora che le tecnologie hanno raggiunto livelli tali da supportarne adeguatamente lo sviluppo. Le prime sperimentazioni in ambito agricolo stanno portando risultati incoraggianti in questa direzione (*Fig. 21*).

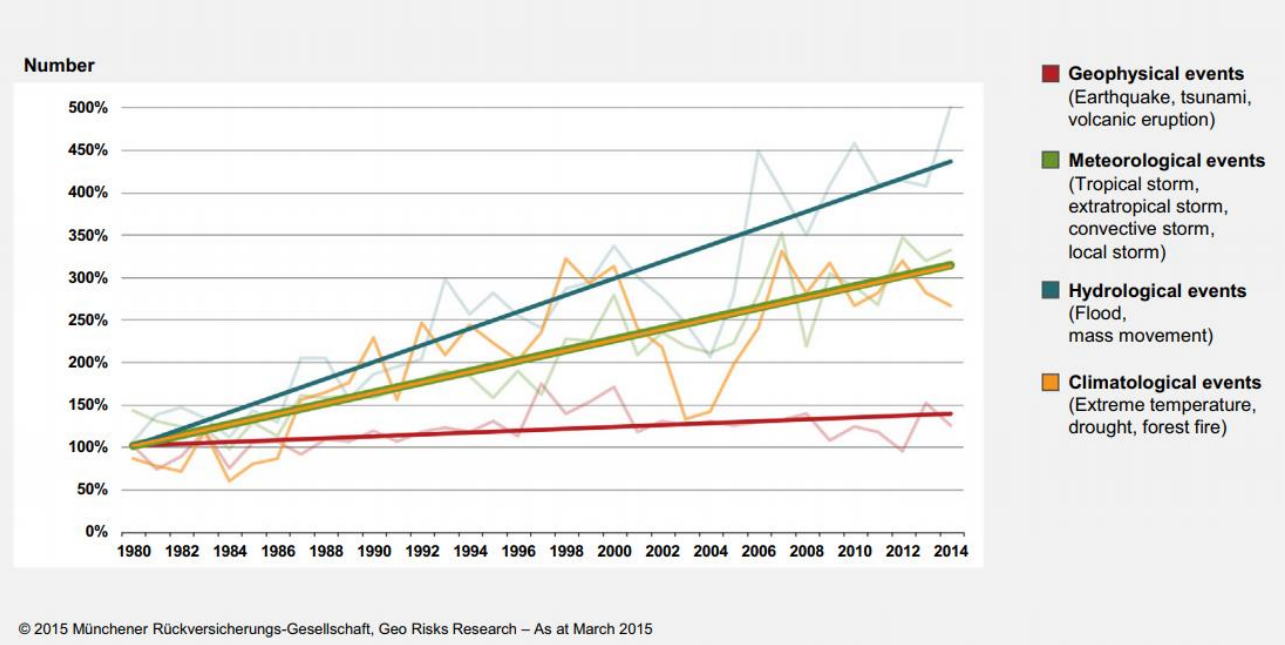

Fig. 21 Andamento relativo delle perdite economiche dovute ad eventi naturali per i 4 gruppi di sinistri (anno di riferimento 1980) a livello mondiale. Le linee rappresentano la regressione lineare delle singole curve. I trend sono statisticamente significativi per ciascuna famiglia di sinistro, tuttavia è evidente come i sinistri di tipo meteo-climatico (Meteorological events, Hydrological events e Climatological events) mostrino un aumento più rapido rispetto agli eventi di tipo geofisico (terremoti, eruzioni vulcaniche ecc.). Fonte: Munich Re NatCatSERVICE.

5. NOTE

[1] Massimo Crespi: già Ispettore del Corpo Forestale dello Stato, Direttore del Centro Sperimentale per le valanghe e la difesa idrogeologica di Arabba (Regione Veneto), Direttore del Centro Meteorologico di Teolo (ARPA Veneto), Direttore della Ricerca e Comunicazione di ARPA Veneto, Direttore Generale della Pianificazione e Programmazione della Regione del Veneto, Delegato Nazionale presso la WMO dell'ONU, Direttore del Centro di monitoraggio meteorologico, ambientale ed idrologico della Unione Europea in Asunciòn (Paraguay). Attualmente Amministratore unico di Radarmeteo Srl e Presidente di Hypermeteo Srl.

[2] Gianluca Ferrari: Esperto di meteorologia applicata al *Risk assessment*, Dirigente del settore gestione del rischio di Radarmeteo Srl e Responsabile del settore analisi dati di Hypermeteo Srl.

[3] Massimo Crespi: "Caratteristiche e rappresentatività della meteorologia di precisione nel contesto nazionale" - "Quaderni di meteorologia aperta" n. 1-2020 www.radarmeteo.com.

[4] WMO: *World Meteorological Organization* (Organizzazione Meteorologica Mondiale), Agenzia tecnica dell'ONU (Organizzazione delle Nazioni Unite) che ha il compito di coordinare a livello globale la meteorologia, la climatologia e l'idrologia operativa.

[5] IMO (*International Meteorological Organization).*

[6] UN *(United Nations).*

[7] Olga Tokarczuk "I vagabondi" 2007.

[8] Zenone di Elea "Il paradosso di Achille e della tartaruga" V° sec. a.c..

[9] Zygmunt Bauman "Retrotopia" 2017.

[10] Karl Popper "La Società aperta ed i suoi nemici" 1945.

[11] Henry Leborit "La nouvelle grille" 1974.

[12] Claude Lévi-Strauss "Il pensiero selvaggio" 1962.

[13] Zygmunt Bauman "Modernità liquida" 2000.

[14] Félix Fénéon – 1870.

[15] Presidenza del Consiglio dei Ministri - Agenzia per l'Italia digitale "Dati pubblici-Linee guida patrimonio informativo pubblico" 2018.

[16] ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica della Repubblica Italiana) "Carta dei servizi" 2013.

[17] ECMWF (*European Center for Medium-range Weather Forecast*): Centro europeo di riferimento per la meteorologia e climatologia. Organizzazione indipendente ed intergovernativa.

[18] NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) del *NWS* (*National Weather Service*) USA; NCAR (*National Center for Atmospheric Research)* USA; JMA (*Japan Meteorological Agency*) JAP; BOM (*Bureau of Meteorology – Australian Government*) AUS.

[19]DSS *(Decision Support System).*

[20]DEM (*Digital Elevation Model*).

[21] MOS (*Model Output Statistics*).

[22] Radarmeteo Srl (www.radarmeteo.com).

[23] *Marshall-Palmer* 1948: si tratta della relazione impiegata per convertire la riflettività in intensità di precipitazione.

[24] CFSR (C*limate Forecast System Reanalysis).*

[25]ERA *(*ECMWF *Re-Analysis).*

[26] IFS *(Integrated Forecasting System):* modello previsionale operativo impiegato presso ECMWF[17].

[27] UERRA (*Uncertainties Ensembles Regional Re-Analysis*).

[28] COSMO REA (COnsortium for Small scale Modelling RE-Analysis).

[29]DWD (*Deutscher WetterDienst*) Servizio meteorologico nazionale della Germania.

[30]Le stazioni meteorologiche utilizzate nei *case study* appartengono ai seguenti gestori: Aeronautica Militare, ARPA delle Regioni Veneto, Piemonte, Lombardia, Emilia-Romagna e Calabria, Dipartimento Protezione Civile delle Regioni Friuli Venezia Giulia, Marche e Puglia, Meteotrentino, Provincia Autonoma di Bolzano, Rete agrometeorologica della Regione Puglia, Servizio Idrologico della Regione Toscana, Associazione Meteonetwork, CETEMPS.

[31] WRF(*Weather Research and Forecating model*) sviluppato da enti ed organizzazioni USA.

[32] ICON (*ICOsahedral Nonhydrostatic model*) sviluppato dal DWD[28].

[33] IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*) sviluppato dalla NASA – USA.

[34]PAC (Politica Agricola Comunitaria).

6. BIBLIOGRAFIA

- WMO - Kennedy J.; Dee D.; et al. (2011). *On the Reprocessing and Reanalysis of Observations for Climate*. WCRP OSC Climate Research in Service to Society (Denver, USA).
- Austin, P. M. (1987). *Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall*. Mon. Wea. Rev., 115, 1053–1070.
- Bengtsson, L, Hagemann, S., and Hodges, K. I. (2004). *Can climate trends be calculated from reanalysis data?* J. Geophys Res., 109.
- Bengtsson, L., and Shukla, J. (1988). *Integration of space and in situ observations to study global climate change*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 69, 1130–1143.
- Berg, E., & Schmitz, B. (2008). *Weather-based instruments in the context of whole-farm risk management*. Agricultural Finance Review, 68(1), 119–133.
- Betts, A. K., M.Zhao, P. A.Dirmeyer, and A. C. M.Beljaars, 2006: *Comparison of ERA-40 and NCEP/DOE near-surface data sets with other ISLSCP-II data sets.* J. Geophys. Res., 111.D22S04.
- Black, E., E. Tarnavsky, H. Greatrex, R. Maidment, A. Mookerjee, T. Quaife, and J. Price, (2015). *Exploiting satellite-based rainfall for weather index insurance: The challenges of spatial and temporal aggregation*. Proc. First Int. Electronic Conf. on Remote Sensing, 1–19.
- Bollmeyer, C., and Coauthors, 2015: *Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 141, 1–15.
- Bosilovich, M. G., Kennedy, J., Dee, D., Allan, R., .and O'Neill, A. (2011). *On the reprocessing and reanalysis of observations for climate. Climate Science for Serving Society: Research, Modeling and Prediction Priorities*, G. R. Asrar and J. W. Hurrell, Eds., Springer, 51–71.
- Bosilovich, M.G., J. Chen, F.R. Robertson, and R.F. Adler (2008). *Evaluation of Global Precipitation in Reanalyses* (J. Appl. Meteor. Climatol., 47, 2279–2299).
- Caesar, J., Alexander, L., Vose, R. (2006). *Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: creation and analysis of a new gridded dataset*. J Geophys Res 111.
- Compo, G. P., and Coauthors. (2011). *The Twentieth Century Reanalysis Project. Quart.* J. Roy. Meteor. Soc., 137A, 1–28.
- Conradt, S., R. Finger, and M. Spörri, (2015). *Flexible weather index-based insurance design*. *Climate Risk Manage*. 10, 106–117.
- De Rooy, W.C., Kok, K. (2004). *A combined physical-statistical approach for the downscaling of model wind speed*. Weather Forecast 19:485–495.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Holm, E.V., Isaksen, L., Kaallberg, P., Kohler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, T.J.N., Vitart, F. (2011). *The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system* (Q. J. R. Meteorol. Soc. 137: 553–597).
- Delle Monache, L., T.Eckel, D.Rife, and B.Nagarajan, (2013) *Probabilistic weather prediction with an analog ensemble*. Mon. Wea. Rev., 141, 3498–3516.
- Derin, Y., and Coauthors, (2016). *Multiregional satellite precipitation products evaluation over complex terrain*. J. Hydrometeor., 17, 1817–1836.
- Durán, L., and Rodríguez-Muñoz, I. (2016). *Automatic monitoring of weather and climate in mountain areas. The case of Peñalara Meteorological Network* (RMPNP). Atmos. Meas. Tech. Discuss., doi:10.5194/amt-2015-248.

- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, (2017). *ERA5 reanalysis*. National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, accessed 7 September 2019.
- European Commission, (2017). Uncertainties in Ensembles of Regional Reanalyses. European FP7 Project, European Commission, http://www.uerra.eu.
- Frei, C. (2014). *Interpolation of temperature in a mountainous region using nonlinear profiles and non-Euclidean distances*. Int J Climatol 34: 1585–1605.
- Frick, C., Steiner, H., Mazurkiewicz, A., Riediger, U., Rauthe, M., Reich, T., Gratzky, A. (2014). *Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): mean temperature and relative humidity*. Met Z 23(1):15–32.
- Greatrex, H., J. Hansen, S. Garvin, R. Diro, S. Blakeley, M. Le Guen, K. Rao, and D. Osgood (2015). *Scaling up index insurance for smallholder farmers: Recent evidence and insights.* Climate Change, Agriculture and Food Security Rep. 14, 32 pp.
- Haylock, M., N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, and M. New (2008). *A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature, precipitation and sea-level pressure*, J. Geophys. Res., 113, D20119.
- Henn, B., A. J.Newman, B.Livneh, C.Daly, and J. D.Lundquist, (2018). *An assessment of differences in gridded precipitation datasets in complex terrain*. J. Hydrol., 556, 1205–1219.
- Herrera, S., Gutierrez, J.M., Ancell, R., Pons, M.R., Frias, M.D., Fernandez, J. (2012). *Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02)*. Int J Climatol 32:74–85.
- Hoeppe, P. (2016). *Trends in weather related isasters – Consequences for insurers and society* (Weather and Climate Extremes 11, 70–79).
- Hofstra, N., M. Haylock, M. New, P. Jones, and C. Frei (2008). *The comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data*, J. Geophys. Res., 113.
- Hofstra, N., M.Haylock, M.New, and P. D.Jones, (2009). *Testing E-OBS European high-resolution gridded data set of daily precipitation and surface temperature*. J. Geophys. Res., 114, D21101.
- Hou, A. Y., and Coauthors, (2014). *The Global Precipitation Measurement mission*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 95, 701–722.
- Huffman, G. J., D. T.Bolvin, D.Braithwaite, K.Hsu, R.Joyce, and P.Xie, (2014). *NASA Global Precipitation Measurement Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM* (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Doc., version 4.4, 30 pp.
- Isotta, F. A., and Coauthors, (2014). *The climate of daily precipitation in the Alps: Development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data*. Int. J. Climatol., 34, 1657–1675.
- J. Bruinsma (2012). *World agriculture towards 2030/2050*. FAO
- Kalnay, E., and Coauthors. (1996). *The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437–471.
- Keller, J. D., L. Delle Monache, and S. Alessandrini, (2017). *Statistical Downscaling of a High-Resolution Precipitation Reanalysis Using the Analog Ensemble Method.* J. Appl. Meteor. Climatol., 56, 2081–2095.
- Klein Tank, A., and Coauthors, (2002). *Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment*. Int. J. Climatol., 22, 1441–1453.
- Klok, L., and A. M. G. Klein Tank (2008). *Updated and extended European dataset of daily climate observations*, Int. J. Climatol., 29, 1182–1191.
- Krähenmann, S., Walter, A., Brienen, S., Imbery, F., and Matzarakis, A. (2017). *High-resolution grids of hourly meteorological variables for Germany*. Theor. Appl. Climatol., 131, 899–926.
- Lazo, J. K., Lawson, M., Larsen, P. H., & Waldman, D. M. (2011). *US economic sensitivity to weather variability*. Bulletin of the American Meteorological Society, 92(6), 709–720.
- Masatomo Fujiwara, Jonathon S. Wright, Gloria L. Manney, Lesley J. Gray, James Anstey, Thomas Birner, Sean Davis, Edwin P. Gerber, V. Lynn Harvey, Michaela I. Hegglin, Cameron R. Homeyer, John A. Knox, Kirstin Krüger,

Alyn Lambert, Craig S. Long, Patrick Martineau, Andrea Molod, Beatriz M. Monge-Sanz, Michelle L. Santee, Susann Tegtmeier, Simon Chabrillat, David G. H. Tan, David R. Jackson, Saroja Polavarapu, Gilbert P. Compo, Rossana Dragani, Wesley Ebisuzaki, Yayoi Harada, Chiaki Kobayashi, Will McCarty, Kazutoshi Onogi, Steven Pawson. (2017). *Introduction to the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems* (Atmos. Chem. Phys., 17, 1417–1452).

- Mesinger, F., and Coauthors, (2006). North American Regional Reanalysis. Bull. Amer. Meteor. Soc., 87, 343–360.
- Müller, M.D. (2011). *Effects of Model Resolution and Statistical Postprocessing on Shelter Temperature*. Journal of applied meteorology and climatology, Vol. 50, Nr. 8. pp. 1627-1636.
- Mußhoff, O., Odening, M., & Xu, W. (2011). *Management of climate risks in agriculture—will weather derivatives permeate?* Applied Economics, 43(9), 1067–1077.
- Newman, A. J., M. P. Clark, R. J. Longman, and T. W. Giambelluca, (2019). *Methodological Intercomparisons of Station-Based Gridded Meteorological Products: Utility, Limitations, and Paths Forward*. J. Hydrometeor., 20, 531–547.
- Nurmi P. (2003). *Recommendations on the verification of local weather forecasts.* ECMWF Technical Memorand.
- Odening, M., Muhoff, O., & Xu, W. (2007). *Analysis of rainfall derivatives using daily precipitation models: Opportunities and pitfalls*. Agricultural Finance Review, 67(1), 135–156.
- Parker, W.S. (2016). *Reanalyses and Observations: What's the Difference?* Bulletin of the American Meteorological Society 97 (9): 1565-1572.
- Pierce, D. W., D. R.Cayan, and B. L.Thrasher, (2014). *Statistical downscaling using localized constructed analogs (LOCA). J. Hydrometeor., 15, 2558–2585.*
- Prein, A., and A.Gobiet, (2017). *Impacts of uncertainties in European gridded precipitation observations on regional climate analysis*. Int. J. Climatol., 37, 305–327.
- Q.J.R. Meteorol Soc 137:553–597., D. P. (2005). *Bias and data assimilation*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131, 3323–3343.
- Ritter, M., O. Musshoff, and M. Odening, (2014). *Minimizing geographical basis risk of weather derivatives using a multi-site rainfall model*. Comput. Econ., 44, 67–86.
- Saha, S., and Coauthors. (2010). *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91.
- Schiemann, R. et al. (2010). *Geostatistical radar-raingauge combination with nonparametric correlograms methodological considerations and application in Switzerland*, Hydrology and Earth System Sciences.
- Sinclair, S., Pegram, G. (2005). *Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging*. Atmospheric Science Letters, 6, 19-22.
- Stahl, K., Moore, R.D., Floyer, J.A., Asplin, M.G., McKendry, I.G. (2006). *Comparison of approaches for spatial interpolation of daily temperature in a large region with complex topography and highly variable station density*. Agr For Meteorol 139:224–236.
- Thorne, P., and Vose, R. S. (2010). *Reanalyses suitable for characterizing long-term trends*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91, 353–361.
- Vedenov, D. V., and B. J. Barnett, (2004). *Efficiency of weather derivatives as primary crop insurance instruments*. J. Agric. Resour. Econ., 29, 387–403.
- Velasco-Forero, C. A., et al. (2008). *A non-parametric automatic blending methodology to estimate rainfall fields from rain gauge and radar data*, Elsevier Ltd.
- Walton, D., and A.Hall, (2018). *An assessment of high-resolution gridded temperature datasets over California*. J. Climate, 31, 3789–3810.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences. International Geophysics Series*, Volume 91, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University, Elsevier.

- Williams, T. M., and W. R. Travis, (2019). *Evaluating Alternative Drought Indicators in a Weather Index Insurance Instrument*. Wea. Climate Soc., 11, 629–649.
- Wilson, L. J., and M.Vallée, (2002). *The Canadian Updateable Model Output Statistics (UMOS) system: Design and development test*. Wea. Forecasting, 17, 206–222.
- Woodard, J. D., and P. Garcia, (2008). *Basis risk and weather hedging effectiveness*. Agric. Finance Rev., 68, 99–117.
- Xu, W., Filler, G., Odening, M., & Okhrin, O. (2010). *On the systemic nature of weather risk*. Agricultural Finance Review, 70(2), 267–284.
- Yan H., Gallus W. A. (2016). *An Evaluation of QPF from the WRF, NAM, and GFS Models Using Multiple Verification Methods over a Small Domain* (Wea. Forecasting, 31, 1363–1379).
- Yuval, and W. W. Hsieh, (2003). *An Adaptive Nonlinear MOS Scheme for Precipitation Forecasts Using Neural Networks*. Wea. Forecasting, 18, 303–310.
- Zhang, J., Qi, Y., Langston, C., Kaney, B., and Howard, K. (2014). *A real-time algorithm for merging radar QPEs with rain gauge observations and orographic precipitation climatology*. J. Hydrometeor, 15, 1794–1809.

FSC
www.fsc.org

Radarmeteo
Professional weather services

PMI innovativa
radarmeteo.com
info@radarmeteo.com

Hypermeteo
Climate & weather grids

Startup innovativa
hypermeteo.com
info@hypermeteo.com