

Quanto efficacemente riescono le rianalisi globali e regionali a catturare i segnali spaziali e temporali delle temperature e delle precipitazioni sul territorio italiano?

Francesco Cavalleri^{1,2}, Veronica Manara¹, Francesca Viterbo², Maurizio Maugeri¹

[1] Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali, Università Statale di Milano

[2] Gruppo Clima e Meteorologia, Ricerca sul Sistema Energetico, Milano

Sommario

I cambiamenti climatici rendono sempre più urgente disporre di strumenti affidabili per comprendere e monitorare l'evoluzione dei fenomeni atmosferici. Le rianalisi meteorologiche possono rispondere a questa necessità, fornendo dataset su griglia che riproducono nella maniera più completa possibile le condizioni atmosferiche dei decenni passati a passo orario. Questi prodotti sono essenziali per pianificare interventi di mitigazione degli impatti dei fenomeni estremi in settori strategici come la gestione delle risorse idriche, lo sviluppo di fonti energetiche rinnovabili e la pianificazione urbana. Tuttavia, considerata la molteplicità dei dataset di rianalisi esistenti sull'Italia e le specificità di ciascuno di essi, il lavoro di confronto e validazione rispetto all'osservato è cruciale per garantirne un utilizzo consapevole e massimizzarne il potenziale applicativo, sia per la ricerca che per gli stakeholders.

Cosa sono le rianalisi meteorologiche?

Le rianalisi meteorologiche sono dataset spazialmente distribuiti su più livelli verticali mediante modelli numerici simili a quelli utilizzati per le previsioni meteorologiche, ma qui applicati alla ricostruzione delle condizioni atmosferiche del passato. Le condizioni atmosferiche osservate (che possono provenire da diverse fonti, quali stazioni a terra, termosonde, satelliti, radar, etc.) vengono inserite all'interno del modello tramite una procedura chiamata *data assimilation*. Questo meccanismo produce un continuo riallineamento delle simulazioni alle osservazioni che permette di minimizzare lo scostamento tra i campi prodotti con i modelli e le condizioni atmosferiche misurate. In tal modo, le simulazioni restano sempre vincolate alle condizioni osservate, spingendo il modello verso dei risultati che si avvicinino il più possibile alle condizioni atmosferiche effettivamente verificatesi.

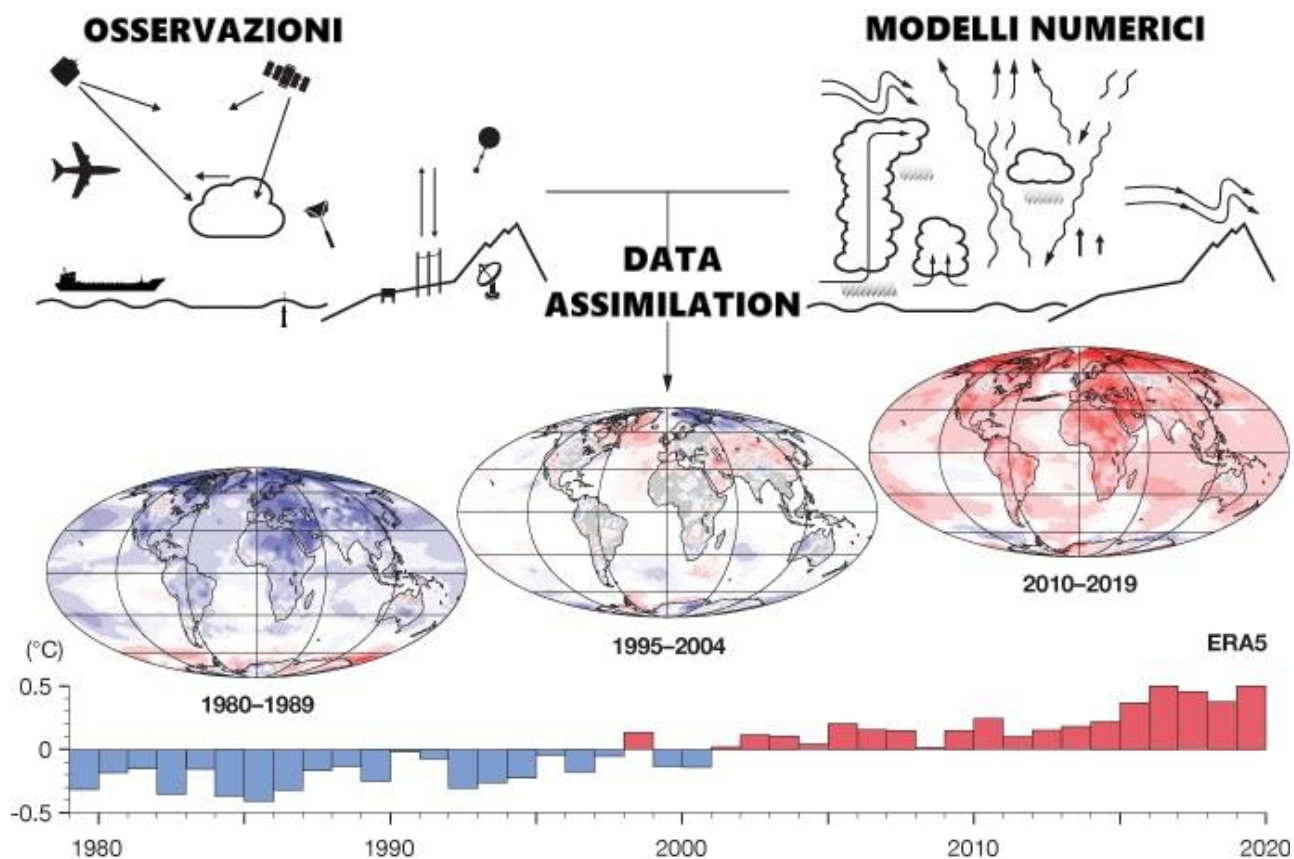


Figura 1: Rappresentazione schematica del processo di rianalisi. Figura adattata da:
<https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2023/fact-sheet-reanalysis>

Le rianalisi si distinguono in globali, che modellano la dinamica dell'intero pianeta con una risoluzione relativamente bassa (oltre 30 km), e regionali, che lavorano con maggiore risoluzione spaziale ma si limitano a considerare solo una specifica area territoriale, perché coprire aree più grandi con una risoluzione elevata richiederebbe risorse e tempi computazionali troppo lunghi. Il processo mediante il quale si ottiene una rianalisi locale a partire da una rianalisi globale è noto come *downscaling* dinamico, in cui le rianalisi globali forniscono le condizioni iniziali e le condizioni al contorno per scendere di risoluzione nelle aree di interesse, tenendo pur sempre conto delle condizioni meteorologiche provenienti dall'esterno del dominio.

Un esempio del valore aggiunto di un aumento di risoluzione delle rianalisi regionali, rispetto alle rianalisi globali, è la possibilità di rappresentare meglio alcuni processi locali, come ad esempio la convezione, la quale gioca un ruolo fondamentale nella formazione di eventi temporaleschi tipicamente estivi, tuttora difficili da prevedere. I modelli globali, a causa della loro bassa risoluzione, sono costretti a rappresentare la convezione tramite delle parametrizzazioni, mentre i modelli regionali più avanzati, sono in grado di calcolarla esplicitamente, con un potenziale miglioramento della descrizione di alcuni tipi di precipitazioni intense ed eventi estremi.

A cosa servono le rianalisi e che vantaggi presentano?

Le rianalisi rispondono alla necessità di disporre di dataset di variabili atmosferiche su griglia per molteplici settori. Oltre alle applicazioni puramente di ricerca, esse sono ampiamente applicate in vari ambiti, quali ad esempio le politiche e la gestione dei consumi per il raffrescamento estivo e il riscaldamento invernale delle abitazioni, la pianificazione urbana e infrastrutturale, l'aumento della resilienza, lo studio della producibilità e sviluppo delle fonti rinnovabili, la gestione delle risorse idriche, ed in ambito agricolo.

I vantaggi delle rianalisi sono molteplici. Innanzitutto, in quanto prodotte attraverso un modello numerico basato su leggi fisiche, le rianalisi garantiscono la consistenza tra le diverse variabili e permettono di minimizzare l'impatto degli errori di misura sui gradienti spaziali delle varie variabili. Inoltre, esse forniscono i valori di numerose variabili meteorologiche (alcune di esse non misurabili direttamente) senza discontinuità, sia a livello spaziale che a livello temporale. Infine, le rianalisi consentono di superare alcuni importanti limiti dei dataset osservativi, come la non omogenea distribuzione spaziale delle stazioni meteorologiche, la presenza di dati mancanti nelle serie osservative e la difficoltà nel catturare fenomeni estremi molto localizzati laddove le stazioni non sono presenti.

Le rianalisi disponibili per l'Italia e la necessità di un confronto

La rianalisi globale più utilizzata attualmente è ERA5, prodotta dal centro europeo ECMWF con il modello IFS, ad una risoluzione di circa 31 km. Un affinamento specifico a circa 9 km per le sole terre emerse è rappresentato da ERA5-Land. A livello europeo, sono disponibili diverse rianalisi regionali come COSMO-REA6, sviluppata dal servizio meteorologico tedesco (DWD), e CERRA, sviluppata nel *framework* di Copernicus C3S, il progetto di monitoraggio climatico dell'Unione Europea. Negli ultimi anni sono state sviluppate specificatamente per l'Italia anche varie rianalisi regionali ottenute tramite *downscaling* dinamico di ERA5. Tra queste, le rianalisi MERIDA e MERIDA-HRES, prodotte da RSE con il modello WRF, hanno una risoluzione rispettivamente di 7 km e 4 km. BOLAM e MOLOCH, sviluppate dal LAMMA, effettuano il *downscaling* di ERA5 rispettivamente a 7 km e 2,5 km. Inoltre, SPHERA e VHR-REA_IT, prodotte rispettivamente da ARPAE e CMCC con il modello COSMO, hanno entrambe una risoluzione di 2,2 km e fanno parte della categoria dei prodotti che modellano esplicitamente la convezione, insieme a MERIDA-HRES e MOLOCH.

Un aspetto peculiare della disponibilità di rianalisi per l'Italia è che diverse istituzioni (RSE, CNR-ISAC, CMCC, LaMMA, ARPAE) hanno sviluppato in maniera indipendente rianalisi regionali, sfruttando diversi modelli atmosferici e talvolta assimilando ulteriori dati osservativi, generando così una situazione in cui molteplici prodotti sono disponibili per la stessa area (Tabella 1). Questa ricca disponibilità di dati è una risorsa importante perché prodotti differenti possono avere performance migliori a seconda dei diversi settings e modelli utilizzati, risultando più adatti a rappresentare diversi fenomeni e conseguentemente migliori per alcune applicazioni rispetto ad altre. Il confronto tra rianalisi diverse aiuta a comprendere meglio i vantaggi e i limiti di ognuna.

Nome	Sviluppato da	Modello usato	Condizioni al contorno	Griglia (km)	Estensione spaziale	Estensione temporale	Convezione esplicita
ERA5	ECMWF	IFS	/	31	globale	1940 - 5 giorni prima del presente	No
ERA5-Land	ECMWF	IFS	/	9	globale	1950 - 5 giorni prima del presente	No
CERRA	ECMWF	ALADIN	ERA5	5.5	Europa	1986-2022	No
COSMO-REA6	DWD	COSMO	ERA-Interim	6	Europa	1984-2021	No
BOLAM	LaMMA	BOLAM	ERA5	7	sud Europa	1979-2024	No
MERIDA	RSE	WRF-ARW	ERA5	7	Italia	1986-2023	No
MERIDA-HRES	RSE	WRF	ERA5	4	Italia	1986-2022	Yes
MOLOCH	LaMMA	MOLOCH	BOLAM	2.5	Italia	1979-2024	Yes
VHR-REA_IT	CMCC	COSMO	ERA5	2.2	Italia	1981-2023	Yes
SPHERA	ARPAE	COSMO	ERA5	2.2	Italia	1995-2019	Yes

Tabella 1: Elenco e caratteristiche dei diversi prodotti di rianalisi considerati nel lavoro di validazione. ECMWF: European Centre for Medium-range Weather Forecasts, DWD: Deutscher WetterDienst, RSE: Ricerca sul Sistema Energetico, LaMMA: Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica Ambientale, CMCC: Centro euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, ARPAE: Agenzia Regionale Prevenzione, Ambiente ed Energia dell'Emilia-Romagna.

Le limitazioni delle rianalisi e la necessità di validazione

La necessità di validazione delle rianalisi nasce anche dall'esigenza di comprendere meglio come sono in grado di riprodurre la distribuzione spaziale e l'andamento temporale descritto dalle variabili osservative, e quindi provare a ridurre le limitazioni che le rianalisi possono presentare. In primo luogo, fattori come le disomogeneità presenti nelle osservazioni assimilate, che variano notevolmente nello spazio e nel tempo, possono influire sull'accuratezza dei campi ottenuti. Inoltre, la necessaria discretizzazione della superficie terrestre nei modelli numerici porta a una descrizione del profilo orografico che cattura solo in parte la situazione reale, con conseguenze evidenti sui campi ricostruiti. Infine, l'intrinseca natura caotica della dinamica atmosferica, fa sì che il sistema atmosferico modellato possa discostarsi dallo stato reale, soprattutto sulle scale più piccole, nonostante il continuo riallineamento prodotto dall'acquisizione di nuove osservazioni. Di fronte a queste limitazioni, un'attenta fase di validazione delle rianalisi emerge come un passaggio fondamentale per sfruttare appieno il potenziale di questi prodotti.

Un progetto di dottorato sulla validazione e comparazione delle rianalisi

A partire dall'ottobre 2022, nell'ambito di un dottorato di ricerca svolto in collaborazione tra l'Università degli Studi di Milano e Ricerca sul Sistema Energetico (RSE), è stata condotta una validazione di diversi prodotti di rianalisi.

L'obiettivo è stato quello di confrontare tra loro varie rianalisi disponibili per l'Italia, per comprenderne le potenzialità e i limiti nel descrivere le variabili di temperatura e precipitazione. La validazione effettuata ha rappresentato un importante studio per fornire indicazioni sull'utilizzo delle rianalisi per molteplici applicazioni. In particolare, l'attività all'interno di RSE punta a supportare la resilienza dell'infrastruttura elettrica mediante lo studio delle minacce atmosferiche estreme come precipitazione intense, ondate di calore, venti forti, neve umida e mitigare l'impatto di tali eventi sul sistema elettro-energetico italiano.

Temperatura dell'aria al suolo (t2m)

I campi giornalieri della temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo (t2m) di alcuni dei prodotti elencati in Tabella 1 sono stati validati, confrontandoli con un dataset osservativo su griglia ottenuto tramite interpolazione di misure da stazione. L'analisi è stata svolta esaminando il trentennio 1991-2020, comune a tutte le rianalisi utilizzate, rappresentando un campione sufficientemente ampio per calcolare le climatologie, ossia delle medie su un lungo periodo.

Una delle sfide nel rappresentare correttamente la t2m nei dataset di rianalisi, risiede nella capacità di descrivere la reale orografia, rispetto alla sua rappresentazione nei modelli numerici. Questo problema è particolarmente evidente in aree con orografia complessa, dove le forti pendenze e l'alternarsi di creste e valli è difficilmente rappresentabile all'interno di un modello numerico che discretizza le quote su una griglia. Conseguentemente, poiché la temperatura ha una forte dipendenza dalla quota, tali discrepanze possono tradursi in differenti temperature rappresentate dal modello, rispetto all'osservato. Ad esempio, confrontando la temperatura misurata da una stazione in cima ad una montagna con il valore del punto griglia della rianalisi più vicino, si ottiene generalmente una temperatura osservata inferiore rispetto a quella della rianalisi. Ciò è dovuto al fatto che il punto griglia della rianalisi si trova al centro di una cella, la cui elevazione media non corrisponde alla quota (più elevata) a cui è stata misurata la temperatura dalla stazione. Una parte della differenza tra le due temperature è quindi da attribuirsi alla differente descrizione dell'orografia. Il confronto fatto ha cercato di superare questa differenza statica, dovuta alle differenti rappresentazioni dell'orografia, e ha invece studiato gli errori puramente modellistici. Il processo di validazione assume quindi che gli errori del campo osservativo così



Figura 2: Una stazione meteorologica sulla cima di una montagna. Immagine generata con DALL-E.

ottenuto, benché presenti, siano trascurabili rispetto alle differenze con gli output delle rianalisi.

Per assicurare un confronto più equo tra la componente modellistica di rianalisi e le osservazioni, è stata sviluppata in collaborazione con l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del Centro Nazionale delle Ricerche (ISAC-CNR) una tecnica con la quale i dati osservati da singole stazioni sono stati proiettati sulla griglia e sulle quote delle rianalisi. In questo modo, il problema della collocazione delle stazioni ad elevazioni diverse dai nodi della griglia del modello viene risolto, in quanto il metodo di proiezione tiene conto delle differenze, interpolando le temperature osservate alle quote rappresentate dal modello. Inoltre, con questa tecnica si valutano le rianalisi alla loro risoluzione originale, in modo tale da comprendere se i diversi prodotti di rianalisi sono in grado di descrivere l'atmosfera, tenendo conto che le rianalisi a risoluzioni più elevate riescono a riprodurre fenomeni che avvengono nell'atmosfera a scale più piccole (ad esempio al di sotto dei 5-10 km).

Lo scostamento di ciascuna rianalisi dal corrispondente campo osservativo, alla propria risoluzione nativa, è stato scomposto in due parti: l'errore climatologico e l'errore sulle anomalie giornaliere. Ogni temperatura giornaliera, infatti, può essere vista come la somma tra due valori. La media climatologica, ovvero il valore medio su un lungo periodo (nel nostro caso 1991-2020) per tale giorno, ci dice che temperatura è tipica del clima rappresentativo di quella zona in quello specifico giorno dell'anno. Questo valore dipende da caratteristiche come il giorno dell'anno, la quota del punto considerato, la sua distanza dal mare ed altre condizioni geografiche locali. L'anomalia giornaliera, invece, misura, per un dato giorno di uno specifico anno, lo scostamento dalla media climatologica che si ha in uno specifico punto del territorio. Quando esclamiamo «Oggi fa caldo, per essere Gennaio!», significa che si sta verificando un'anomalia positiva di qualche grado. Al contrario, un'anomalia negativa si verifica con una temperatura giornaliera più fredda del solito, dove questa normalità è definita appunto dalla media climatologica. Scomponendo sia le rianalisi che i corrispondenti campi osservativi in queste due componenti, sono state valutate separatamente le deviazioni sistematiche (confrontando le climatologie) da un lato, e l'abilità nel riprodurre la variabilità giornaliera (confrontando le anomalie) dall'altro.

Per le climatologie, il primo indicatore dell'errore utilizzato è il *bias*, ovvero la differenza tra i campi climatologici della rianalisi e i corrispondenti campi osservativi (Figura 3). Questa sottrazione viene effettuata per ciascun punto griglia, grazie al fatto che i campi osservativi sono stati proiettati sulla medesima griglia di ciascuna rianalisi.

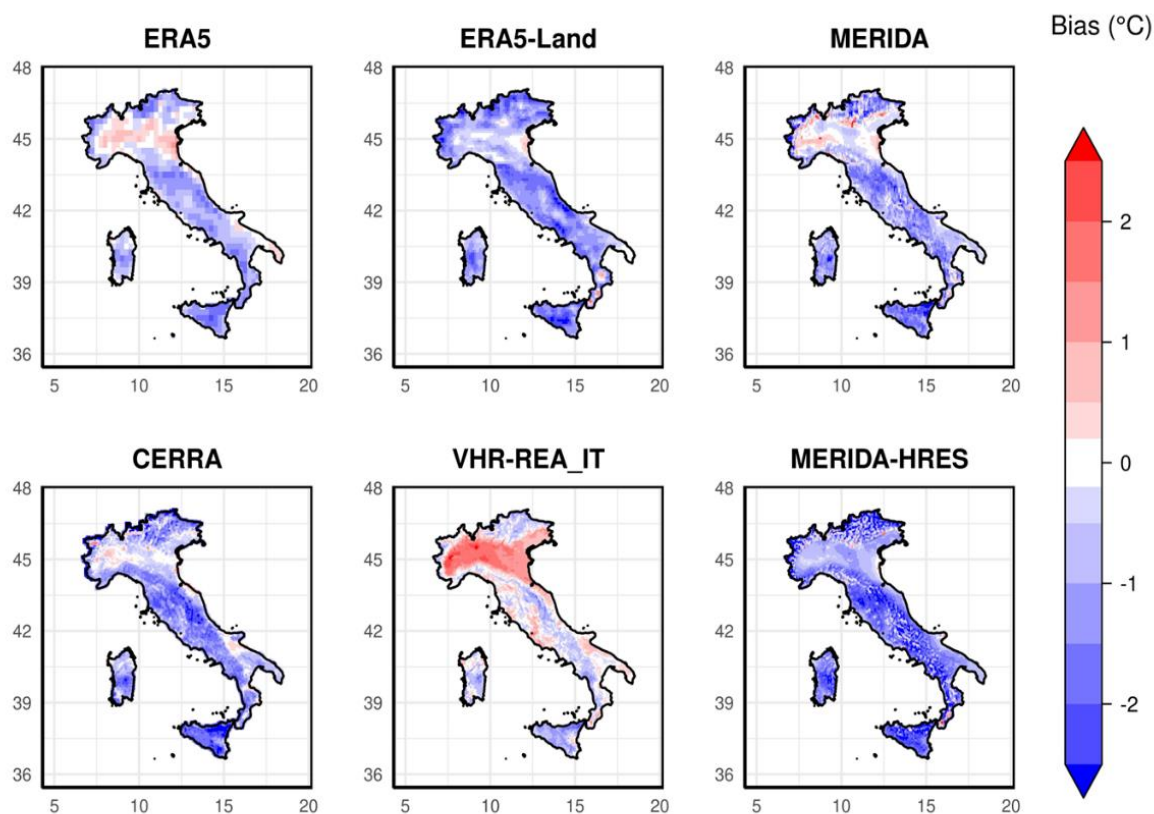


Figura 3: *Bias* climatologici (1991-2020) della t_{2m} per le rianalisi in esame. Figura riadattata da Cavallieri et al. (2024a) e Viterbo et al. (2024).

ERA5 mostra un *bias* freddo da $-0,5$ a -1°C nella maggior parte delle aree, ad eccezione di alcune ampie aree pianeggianti come la Pianura Padana e la Puglia, dove è presente un *bias* positivo di $+0,5^{\circ}\text{C}$. Le rianalisi ad alta risoluzione ERA5-Land, MERIDA, e CERRA mostrano un *pattern* simile, ereditando parzialmente queste differenze da ERA5, con un'intensificazione locale dei *bias* freddi. Un *pattern* simile è condiviso anche da MERIDA-HRES, che presenta però *bias* ancora più freddi e discontinui in prossimità delle zone Alpine ed Appenniniche. VHR-REA_IT mostra invece un *pattern* differente, con un *bias* freddo molto ridotto sulle Alpi, sugli Appennini e sulle isole di Sicilia e Sardegna, mentre è presente un *bias* caldo di $0,5$ – 1°C in quasi tutte le aree pianeggianti, con picchi massimi di $+2^{\circ}\text{C}$ nella parte occidentale della Pianura Padana.

Inoltre, sono state calcolate le differenze tra i valori climatologici stagionali, ottenuti cioè mediando tra loro tutte le temperature medie giornaliere delle singole stagioni, separatamente, nello stesso arco temporale (1991-2020). L'andamento stagionale dell'errore può essere espresso sinteticamente mediando tra loro tutti i punti nello spazio per la determinata stagione in esame. La media semplice (*bias* medio) fornisce un'indicazione della tendenza dell'errore verso il troppo caldo o troppo freddo, mentre la media del valore assoluto (*Mean Average Error*, MAE) consente una valutazione complessiva dello scostamento al di là del suo segno (Tabella 2).

	bias					MAE				
	DJF	MAM	JJA	SON	Annuale	DJF	MAM	JJA	SON	Annuale
ERA5	-0.70	-0.62	-0.64	-0.53	-0.62	0.98	0.73	0.82	0.72	0.77
ERA5-Land	-1.31	-1.25	-0.92	-0.97	-1.11	1.39	1.26	0.98	1.03	1.14
MERIDA	-0.84	-0.86	-0.75	-0.76	-0.80	1.15	0.96	0.90	0.95	0.95
CERRA	-1.19	-0.92	-0.85	-1.15	-1.03	1.25	1.02	1.04	1.18	1.08
VHR-REA_IT	-0.89	0.09	1.22	0.09	0.12	1.01	0.65	1.39	0.73	0.70
MERIDA HRES	-1.49	-1.41	-1.45	-1.39	-1.4	1.56	1.44	1.52	1.44	1.45

Tabella 2: Indicatori climatologici medi stagionali ed annuali, *bias* (a sinistra), MAE (a destra). Tabella tratta da Cavalleri et al. (2024a) e Viterbo et al. (2024).

I valori in Tabella 2 a sinistra mostrano che il *bias* freddo sulle aree montuose è più marcato in inverno per la maggior parte delle rianalisi (ERA5, ERA5-Land, MERIDA, CERRA). In particolare, le mappe stagionali (qui non riportate) mostrano che è la zona Alpina quella in cui il *bias* è maggiore in inverno. Il *bias* freddo di MERIDA-HRES è invece costante nelle stagioni. Al contrario, il forte *bias* caldo di VHR-REA_IT è ulteriormente accentuato in estate, soprattutto in Pianura Padana, con picchi fino a +3°C. Considerando invece il MAE (Tabella 2, a destra), esso è inferiore a 1°C per ERA5 in tutte le stagioni, con i valori più alti in inverno. Le altre rianalisi mostrano MAE più elevati, soprattutto in inverno.

Successivamente, le anomalie giornaliere sono state calcolate sottraendo al valore della t2m di ciascun giorno il valore climatologico caratteristico di tale giorno. Questa operazione è stata svolta separatamente per ogni rianalisi e per i corrispondenti dataset osservativi. Infine, i campi delle anomalie giornaliere da rianalisi sono stati confrontati con i corrispettivi campi di anomalie da osservato calcolando la frazione di varianza condivisa (che corrisponde alla correlazione elevata al quadrato). Essa quantifica la misura in cui, per ciascun punto, la serie dei valori della rianalisi e quelli del dataset osservativo variano alla stessa maniera da un giorno all'altro, o meno. Le risultanti mappe sono mostrate in Figura 4. I valori della correlazione tra le anomalie mediati nello spazio, anche per quanto riguarda l'analisi su base stagionale, sono riportati in Tabella 3, a sinistra. Un modo alternativo per quantificare lo scostamento delle anomalie giornaliere delle rianalisi da quelle osservative è mediare nel tempo il valore assoluto della differenza giornaliera tra di esse. Il risultante *Mean Average Error* (MAE) misura quindi di quanti gradi, in media, le anomalie giornaliere delle rianalisi deviano da quelle osservative. Le mappe del MAE tra le anomalie (figure qui non riportate) mostrano un pattern simile a quello della correlazione in Figura 4; vengono riportati invece i valori mediati nello spazio (Tabella 3, a destra).

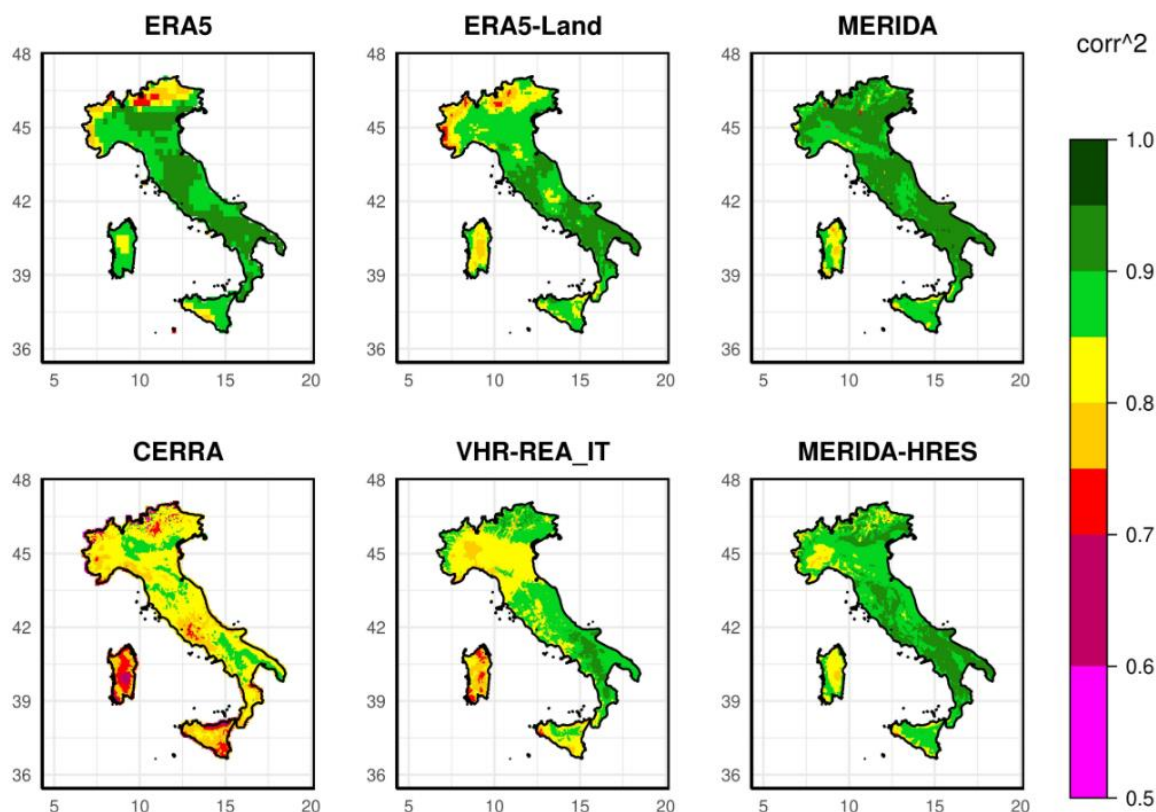


Figura 4: Mappe delle frazioni di varianza condivisa tra i campi delle anomalie di t2m ottenute dalle rianalisi ed i corrispondenti campi osservativi. Figura riadattata da Cavalleri et al. (2024a) e Viterbo et al. (2024).

Le maggiori deviazioni delle anomalie da rianalisi rispetto a quelle osservative si trovano nelle aree montuose. ERA5-Land replica il pattern di ERA5, con una correlazione più bassa sulle Alpi. CERRA, invece, registra correlazioni più basse in generale ed in particolare sulle Alpi e nelle isole. Un aspetto interessante è che le rianalisi prodotte specificatamente per l'Italia (MERIDA, MERIDA HRES, e VHR-REA_IT) mostrano valori di correlazione più omogenei rispetto ai prodotti globali ed europei, sia nello spazio che attraverso le stagioni. Tra di esse, MERIDA e MERIDA-HRES registrano i valori di correlazione più alti. CERRA risulta il prodotto con la correlazione media più bassa.

	frazione di varianza condivisa					MAE nel tempo				
	DJF	MAM	JJA	SON	Annuale	DJF	MAM	JJA	SON	Annuale
ERA5	0.85	0.90	0.90	0.89	0.88	0.93	0.69	0.64	0.71	0.74
ERA5-Land	0.84	0.89	0.89	0.88	0.87	0.93	0.71	0.69	0.71	0.76
MERIDA	0.88	0.90	0.90	0.90	0.89	0.80	0.69	0.62	0.67	0.69
CERRA	0.84	0.80	0.79	0.80	0.81	0.94	0.96	0.96	0.91	0.94
VHR-REA_IT	0.84	0.85	0.84	0.85	0.85	1.00	0.89	0.89	0.87	0.91
MERIDA-HRES	0.89	0.89	0.88	0.86	0.88	0.90	0.71	0.65	0.72	0.74

Tabella 3: Valori medi su base stagionale ed annuale degli indicatori dello scostamento tra le anomalie giornaliere della t2m ottenute dalle rianalisi ed i corrispondenti campi osservativi. A sinistra, le frazioni di varianza condivisa; a destra, i MAE. Tabella tratta da Cavalleri et al. (2024a) e Viterbo et al. (2024).

Un risultato generale di queste analisi è che gli errori nelle anomalie giornaliere (Tabella 3, a destra) presentano un errore più ridotto rispetto agli errori nella climatologia (Tabella 2, a destra) del 30% circa, in media. Questo è ancora più evidente considerando che gli errori della climatologia sono sistematici, mentre quelli delle anomalie giornaliere includono una componente di rumore, che presenta una significativa riduzione passando dai valori giornalieri a periodi più lunghi, come mesi o anni. Per esempio, considerando l'errore nelle anomalie mensili, si trova una ulteriore riduzione del MAE del 50% in media. Di conseguenza, gli errori sulle anomalie risultano generalmente meno rilevanti per alcuni tipi di applicazioni rispetto agli errori della climatologia. La conoscenza degli errori climatologici – e quindi sistematici – permette di applicare tecniche di correzione dell'errore sistematico tramite tecniche note con il nome di *bias correction*.

Validazione delle precipitazioni totali (tp)

L'altra variabile su cui si è concentrata la validazione è la precipitazione. Il fatto che le osservazioni di tale variabile non siano assimilate direttamente dalle rianalisi, l'elevata variabilità spaziale della precipitazione e la sua natura intermittente rendono difficile riprodurre con precisione i suoi campi. Tuttavia, i dataset grigliati di precipitazione sono indispensabili per numerose applicazioni, comprese le valutazioni degli impatti delle precipitazioni estreme. Le rianalisi possono fornire tali campi, anche laddove non ci sono stazioni di misurazione. Per questo parte dello studio, sono state considerate tutti i prodotti descritti in Tabella 1, ad eccezione di ERA5-Land, che si limita a interpolare i campi di precipitazione di ERA5 su una griglia di 9 km, e quindi per questo non considerata.

Una prima parte dello studio ha previsto un confronto tra i campi di precipitazione giornaliera (ossia accumulata su 24 ore) delle rianalisi, ritagliati sul più ampio dominio comune a tutti i prodotti, compreso tra 35,5°N e 48°N di latitudine e tra 6°E e 18,5°E di longitudine, includendo sia le aree terrestri sia quelle marine. La principale domanda di ricerca in questa fase riguarda la risoluzione spaziale effettiva di ciascun prodotto. In Tabella 1 è riportata la dimensione delle celle, ovvero il passo della griglia su cui la rianalisi rappresenta le variabili atmosferiche. Tuttavia, questa distanza non coincide necessariamente con la scala spaziale più piccola a cui un fenomeno di precipitazione può essere rappresentato.

Le piogge, infatti, possono manifestarsi su diverse scale spaziali: su centinaia di chilometri, come nel caso delle precipitazioni di natura sinottica, oppure su pochi chilometri, come nei temporali, in cui il processo dominante è la convezione. La differenza fondamentale tra la dimensione delle celle di una griglia e la risoluzione effettiva si può comprendere prendendo come esempio il campo di ERA5, che ha un passo di 31 km, ma che può essere interpolato con semplici tecniche statistiche su una griglia ad alta risoluzione di 2 km. Sebbene la griglia interpolata abbia un passo di 2 km, i fenomeni rappresentati su di essa, essendo derivati da un modello a bassa risoluzione (ERA5), manterranno una risoluzione effettiva molto inferiore rispetto alla scala della griglia. Al contrario, un modello che simuli direttamente la dinamica atmosferica a 2 km mostrerà una risoluzione effettiva più elevata.

La tecnica utilizzata per analizzare le risoluzioni effettive dei modelli si basa infatti esattamente sull'interpolazione dei campi di precipitazione giornaliera su una griglia fine, seguita da un progressivo accorpamento dei pixel per ottenere griglie con celle via via più grandi. Nello

specifico, combinando i coefficienti di transizione tra le scale si ricava lo spettro energetico della precipitazione, che indica quanta energia è presente su ciascuna scala. L'energia si può interpretare come la frequenza di fenomeni di precipitazione che si verificano alle diverse scale spaziali. Ad esempio, temporali contribuiscono alle scale più piccole, mentre eventi più estesi aumentano l'energia sulle scale più grandi. Questa procedura è stata applicata ai campi giornalieri di ogni rianalisi e poi, mediando nel tempo sul periodo comune (1995-2019), si è ottenuto lo spettro caratteristico di ciascun dataset (Figura 5). L'energia relativa (asse y) rappresenta la frazione di eventi precipitativi verificatisi a una determinata scala spaziale (asse x).

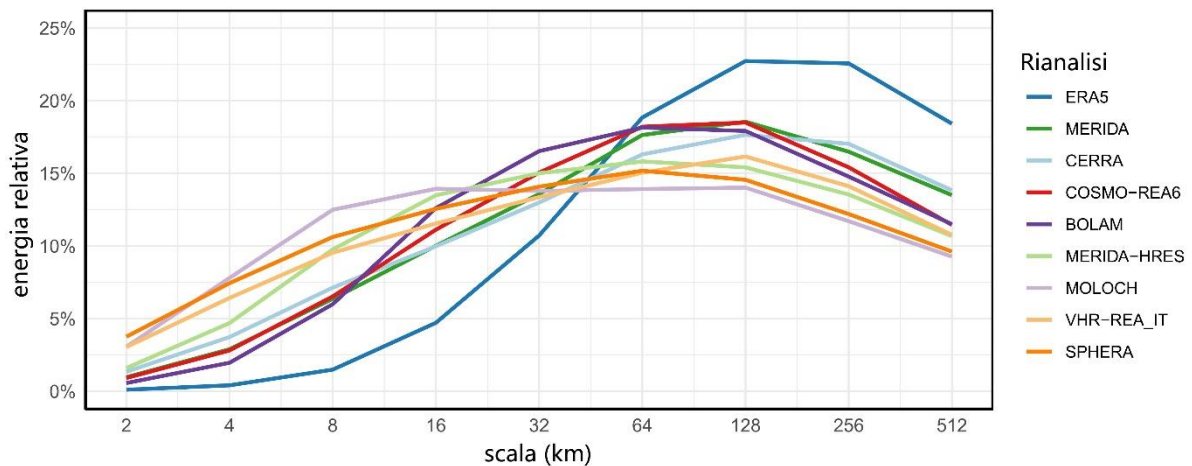


Figura 5: Frazione di energia dei campi di precipitazione giornalieri per le diverse scale spaziali (ogni colore corrisponde ad una rianalisi). Figura tratta da Cavalleri et al. (2024b).

I risultati della decomposizione spettrale mostrano una divisione in tre categorie, ovvero i prodotti globali (ERA5), quelli regionali ma che parametrizzano la convezione (MERIDA, CERRA, COSMO-REA6 e BOLAM) ed infine quelli a convezione esplicita (MERIDA-HRES, MOLOCH, VHR-REA_IT e SPHERA). ERA5 riproduce oltre il 90% degli eventi a scale superiori ai 30 km, mentre è meno accurata rispetto ai modelli ad alta risoluzione nel rappresentare fenomeni più piccoli. I modelli regionali riproducono invece più frequentemente gli eventi tra i 10 ed i 30 km, ed in particolare quelli che permettono la convezione esplicita sono i più efficaci nel descrivere eventi sotto i 10 km di scala.

Per lo stesso periodo ed area di riferimento, è stata analizzata anche la distribuzione della frequenza giornaliera delle precipitazioni (Figura 6). I dati mostrano che ERA5 tende a produrre pochi eventi di precipitazione oltre i 20 mm al giorno. Lo smussamento dei picchi di intensità è direttamente collegato ad un campo di precipitazione meno dettagliato rispetto ai modelli ad alta risoluzione, come evidenziato in precedenza. Tutti gli altri modelli, con alcune differenze tra loro, riproducono più frequentemente precipitazioni oltre i 20 mm al giorno circa.

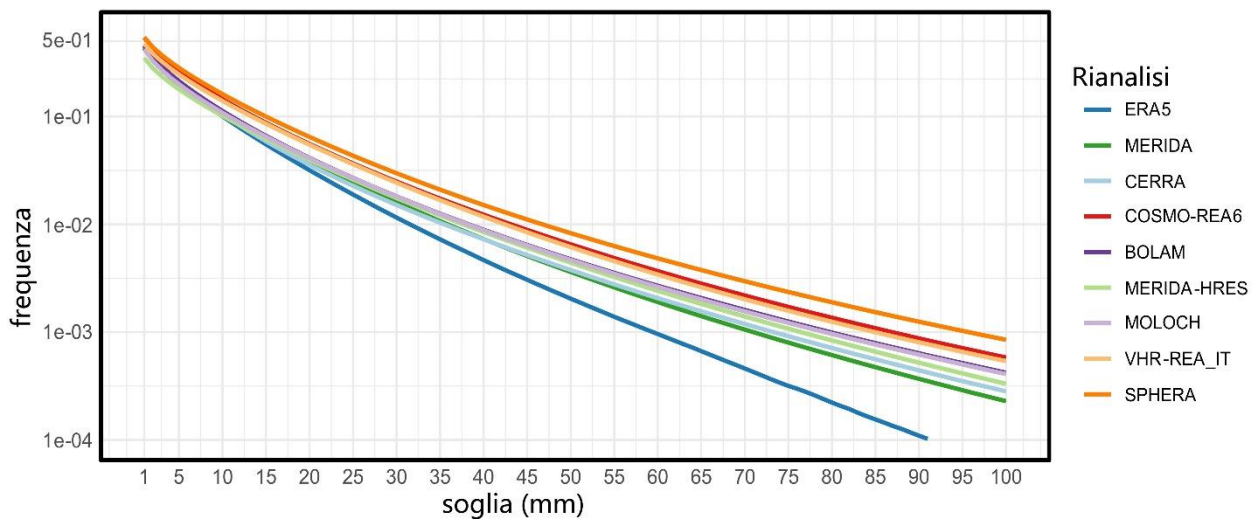


Figura 6: Distribuzione di frequenza delle piogge giornaliere che eccedono soglie fissate (asse x). Ogni colore corrisponde ad una rianalisi. Figura tratta da Cavalleri et al. (2024b).

Successivamente, è stata svolta anche una validazione utilizzando come riferimento osservativo sia misure da singole stazioni che osservazioni interpolate su griglia. Iniziando dalla scala temporale più breve tra quelle analizzate, sono stati considerati i campi di precipitazione giornaliera, messi a confronto con le misurazioni delle stazioni contenute nel *dataset* osservativo delle reti delle Agenzie Regionali di Protezione Ambientale (ARPA) per il periodo 2016-2020. Tale periodo assicura infatti una copertura sufficientemente omogenea del territorio italiano, per il tipo di analisi da effettuare. Il confronto è avvenuto inizialmente tra i valori misurati dalla stazione e quello estratto da ciascuna rianalisi nel punto griglia più vicino ad ogni stazione. Per valutare l'abilità di distinguere tra diversi regimi di precipitazione, è stato scelto un indicatore in grado di classificare un valore di precipitazione in diverse categorie: nessuna pioggia (meno di 1 mm/giorno), pioggia leggera e pioggia intensa. La soglia tra pioggia leggera e pioggia intensa viene stabilita localmente sulla base delle osservazioni di ciascuna stazione, in modo tale che la pioggia leggera avvenga il doppio delle volte rispetto a quella intensa in quel punto. Quando sia la stazione che la rianalisi cadono nella medesima categoria, l'indicatore registra un valore più alto. Dopo aver analizzato tutti i giorni tra il 2016 ed il 2020, si possono ottenere delle mappe dove nella posizione di ciascuna stazione viene disegnato un punto colorato in base alla più o meno elevata corrispondenza riscontrata (Figura 7). L'indicatore, detto SEEPS (*Stable Equitable Error in Probability Space*) ha valore 1 per una perfetta corrispondenza, mentre 0 sarebbe il punteggio ottenuto da un campo di precipitazione generato casualmente.

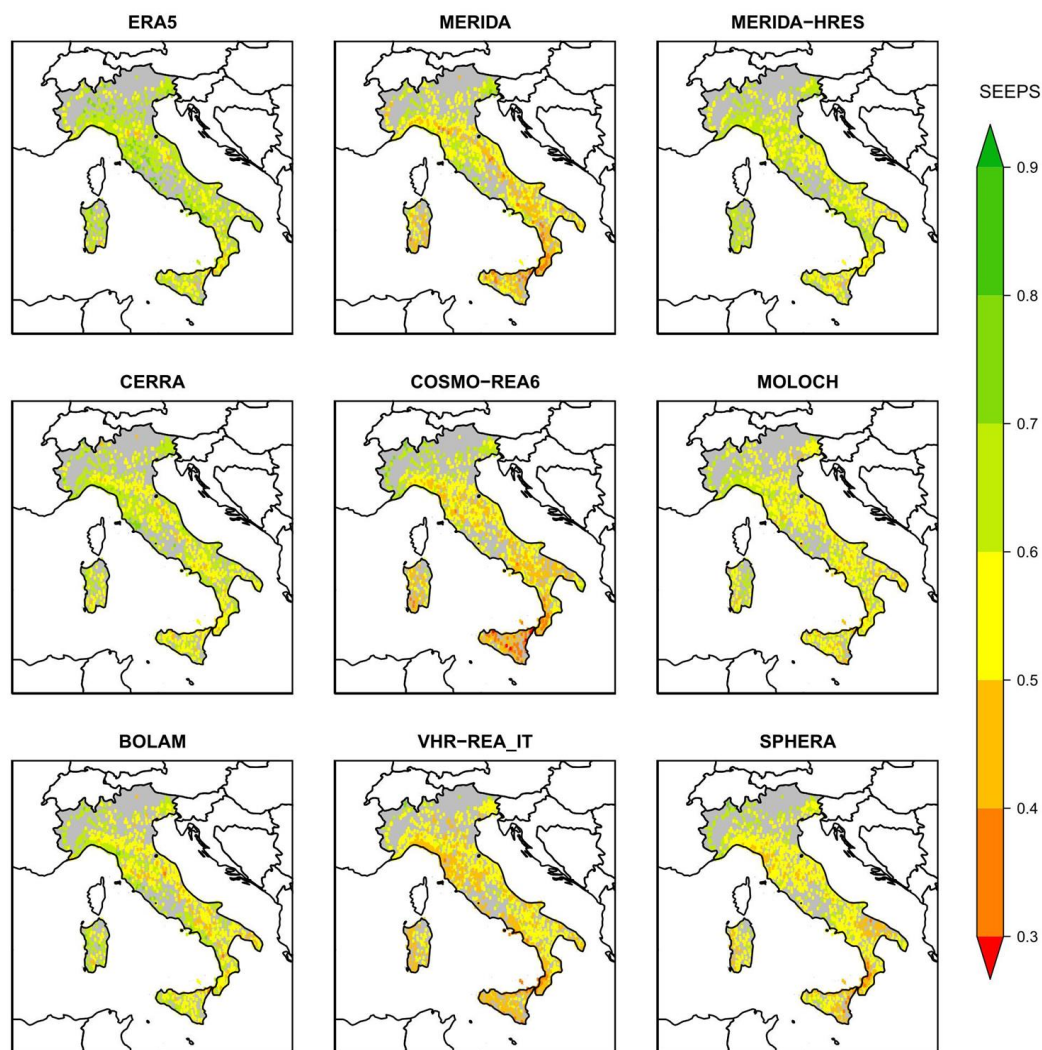


Figura 7: Valori dell'indicatore SEEPS calcolato sul periodo 2016-2020, nelle posizioni delle stazioni osservative di riferimento, per ciascuna rianalisi. Figura tratta da Cavalleri et al. (2024b).

La bassa densità di stazioni meteorologiche nella zona Alpina è dovuta all'esclusione di alcune stazioni che non rispettano alcuni criteri di affidabilità, soprattutto in inverno, in particolare per evitare errori di sottostima o non corretta interpretazione delle precipitazioni solide. In Tabella 4 (colonne di sinistra) sono riportati i valori mediati su tutta Italia, comprese le analisi stagionali. ERA5 offre buone prestazioni su tutto il territorio italiano. I modelli ad alta risoluzione, descrivendo con maggior dettaglio gli eventi meteorologici, risultano invece penalizzati nei confronti diretti con le stazioni, poiché le precipitazioni più localizzate hanno meno probabilità di coincidere esattamente con le osservazioni. Nonostante questa difficoltà, CERRA e MERIDA-HRES registrano punteggi SEEPS simili a ERA5, offrendo però una maggiore precisione nei campi di precipitazione. Altri modelli mostrano prestazioni inferiori in specifiche aree: MERIDA sugli Appennini, VHR-REA_IT e SPHERA nel sud e sulla costa nord-occidentale. MOLOCH e BOLAM ottengono risultati leggermente peggiori, ma senza pattern geografici definiti, mentre COSMO-REA6 riporta i punteggi più bassi, con criticità nel sud e in Sicilia. In generale, i punteggi SEEPS più bassi in estate sono dovuti alla natura convettiva delle

precipitazioni, caratterizzate da scala ridotta e maggiore incertezza intrinseca, aumentando gli errori di localizzazione.

Per valutare l'effetto degli errori di posizionamento degli eventi, l'analisi è stata condotta nuovamente considerando tutti i valori nei punti griglia entro un raggio di 15 km da ciascuna stazione meteorologica, e calcolando il punteggio SEEPS utilizzando tra di essi quello con il valore più simile alla stazione. Con questa nuova condizione, gli errori si sono ridotti significativamente (figura non mostrata) e i modelli ad alta risoluzione hanno registrato punteggi SEEPS superiori rispetto a ERA5 (Tabella 4, colonne di destra).

L'aumento dei punteggi SEEPS quando si considera un più ampio intorno della stazione dimostra che i modelli di rianalisi, pur non sempre riuscendo a prevedere la precipitazione esattamente in corrispondenza della stazione meteorologica che la osserva, riescono comunque a identificarne la categoria (assenza di pioggia, pioggia leggera o pioggia intensa) in un'area circostante di 15 km. Questa incertezza maggiore dipende in parte dalla natura caotica dell'atmosfera, che limita la prevedibilità tanto più si scende alle scale spaziali più piccole.

	punto griglia più vicino					miglior punto griglia entro 15 km				
Rianalisi	DJF	MAM	JJA	SON	anno	DJF	MAM	JJA	SON	anno
ERA5	0.67	0.65	0.49	0.65	0.64	0.67	0.65	0.49	0.65	0.64
MERIDA	0.59	0.58	0.41	0.55	0.55	0.78	0.81	0.73	0.77	0.77
CERRA	0.67	0.64	0.46	0.62	0.61	0.87	0.87	0.83	0.85	0.85
COSMO-REA6	0.58	0.58	0.42	0.55	0.53	0.75	0.78	0.68	0.74	0.73
BOLAM	0.63	0.60	0.45	0.60	0.59	0.8	0.78	0.68	0.77	0.77
MERIDA-HRES	0.69	0.62	0.43	0.63	0.61	0.87	0.85	0.77	0.85	0.84
MOLOCH	0.64	0.58	0.41	0.61	0.58	0.89	0.88	0.83	0.88	0.87
VHR-REA_IT	0.57	0.54	0.42	0.54	0.51	0.79	0.81	0.80	0.79	0.78
SPHERA	0.57	0.59	0.47	0.58	0.55	0.80	0.87	0.86	0.85	0.84

Tabella 4: Valori del SEEPS stagionali ed annuali mediati nello spazio. Periodo di riferimento 2016-2020. Tabella tratta da Cavalleri et al. (2024b).

Un'altra componente dell'errore da considerare è quella delle sovrastime (o sottostime) sistematiche dell'apporto di precipitazione. Questa analisi è stata condotta confrontando le rianalisi con i campi osservativi analoghi a quelli precedentemente descritti per le temperature. In particolare, le cumulate mensili delle precipitazioni osservate sono state interpolate sulla griglia della rianalisi a risoluzione più grossolana (ERA5), ed anche gli altri prodotti sono stati riproiettati (conservando il totale di precipitazione) sulla medesima griglia. Sono state quindi calcolate le climatologie, ovvero le medie su un lungo periodo (qui 1995-2019) sia su base annuale che mensile. La differenza relativa ($\%bias$) tra rianalisi e osservazioni (Figura 8) evidenzia una tendenza generale alla sovrastima delle precipitazioni nel Nord Italia e alla sottostima nel Centro-Sud, con variazioni specifiche tra le diverse rianalisi.

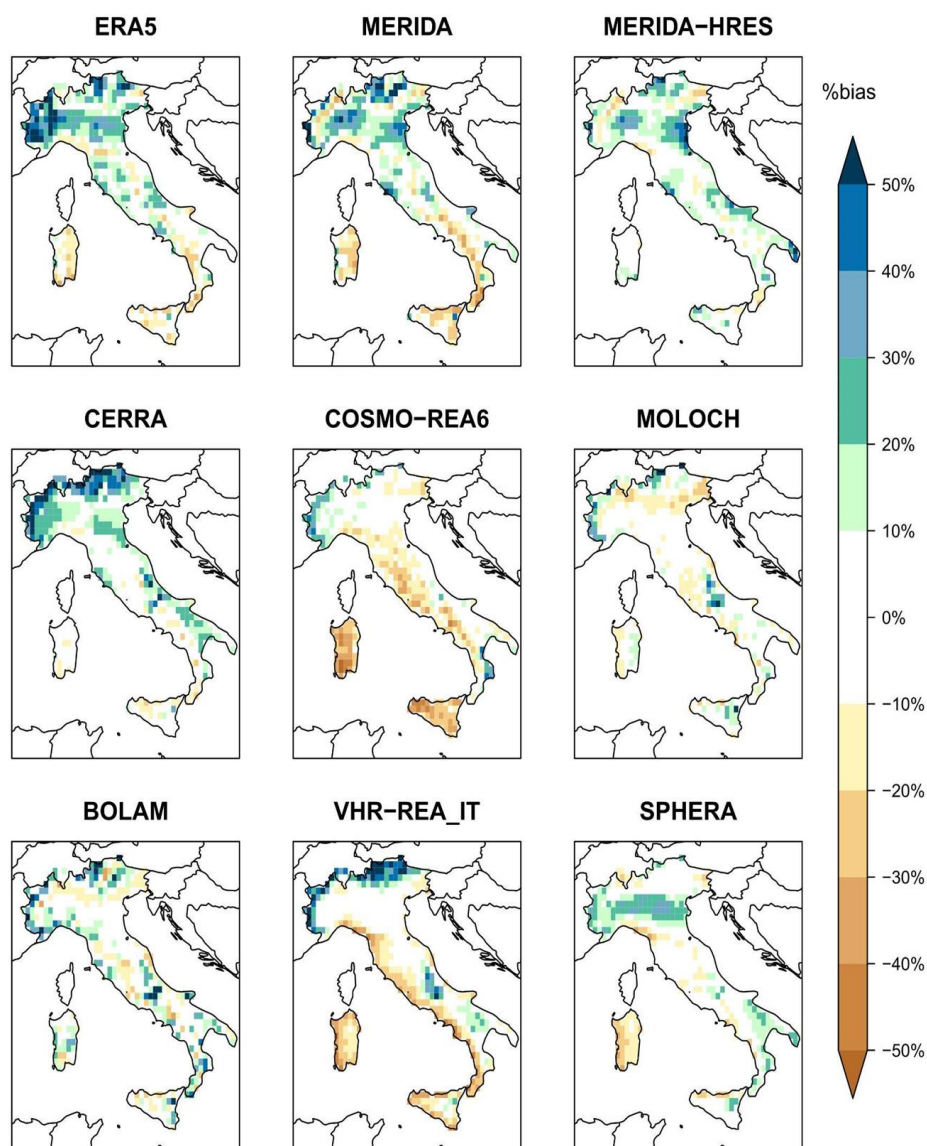


Figura 8: Differenze relative tra le climatologie (1995-2019) di precipitazione delle rianalisi e quelle osservate. Figura tratta da Cavalleri et al. (2024b).

Per valutare la variazione stagionale delle deviazioni sistematiche della precipitazione, sono state confrontate le medie spaziali delle precipitazioni mensili tra rianalisi e osservazioni. Sebbene la stagionalità delle piogge vari a livello regionale, a scala nazionale emerge una tendenza generale alla sovrastima in primavera ed estate. Questo si può evincere calcolando i *%bias* umidi e secchi medi, ovvero mediando per ciascun mese, separatamente, i punti con *%bias* positivo (umido) e negativo (secco). L'andamento di questi valori (Figura 9) evidenzia come tutte le rianalisi presentano un *%bias* secco medio abbastanza stabile intorno al -20% durante l'anno. Nei casi del *%bias* umido, invece, il valore medio è circa +20%, con MOLOCH e COSMO-REA6 che mantengono questa soglia costante. Gli altri modelli registrano invece un incremento tra aprile e settembre, con picchi fino al +60% per MERIDA a luglio.

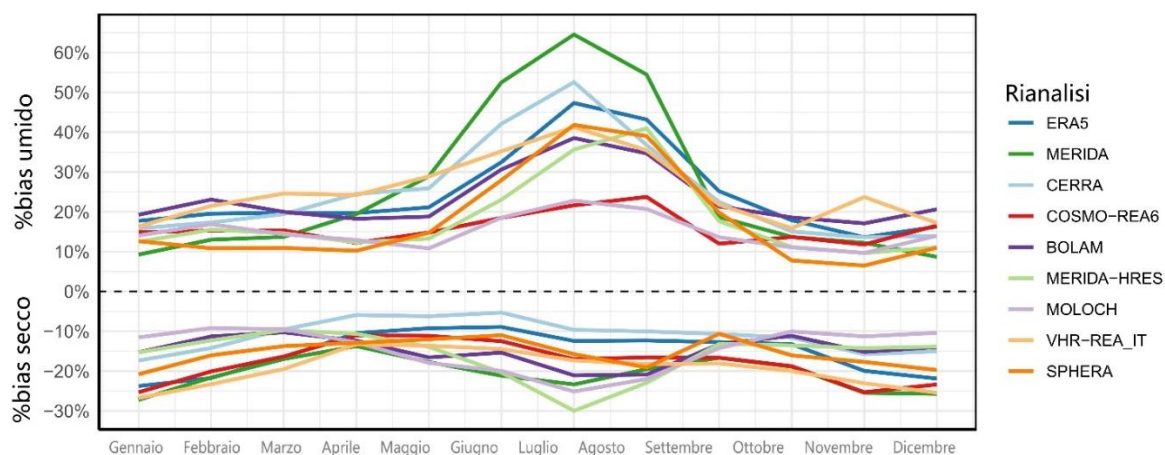


Figura 9: Andamento mensile delle differenze climatologiche relative tra rianalisi ed osservato. Sopra, sovrastime della precipitazione; sotto, sottostime della precipitazione. Ogni colore corrisponde ad una rianalisi. Figura tratta da Cavalleri et al. (2024b).

Un ultimo aspetto cruciale da valutare è l'abilità delle rianalisi nel riprodurre le variazioni di precipitazione su lunghi periodi, per poter comprendere in quale misura le rianalisi siano adatte allo studio dei cambiamenti delle precipitazioni negli ultimi decenni. Per farlo, sono state analizzate le serie temporali dei totali annuali di precipitazione, mediati su tutto il territorio italiano, ottenuti dai campi di rianalisi e da quelli osservativi. Queste serie consentono di calcolare i *trend* a lungo termine, rappresentati dalla pendenza della retta che interpola la serie temporale. Nella prima colonna di Tabella 5 sono riportati i valori di questo *trend* in mm ogni 10 anni: ad esempio, 77 mm/10y significa che ERA5 presenta una cumulata annuale più piovosa di circa 77 mm ogni 10 anni. A titolo di riferimento, le cumulate annuali medie sull'intero territorio italiano si aggirano intorno ai 1000 mm (per la precisione 972 è la media osservativa 1995-2019). Sebbene le tendenze medie non siano significative, si osserva che sono generalmente più alte rispetto alla tendenza media delle osservazioni.

	trend (mm/10y)	Rean – Obs. trend (mm/10y)	(Rean – Obs.)/Obs. %trend (%/10y)	p-val
ERA5	77	31	3%	<0.01
MERIDA	84	31	3%	0.01
CERRA	73	36	3%	<0.01
COSMO-REA6	93	68	7%	<0.01
BOLAM	115	69	7%	<0.01
MERIDA-HRES	86	33	4%	<0.01
MOLOCH	105	75	7%	<0.01
VHR-REA_IT	69	23	2%	0.05
SPHERA	127	98	10%	<0.01

UniMi/ISAC-CNR (Osservazioni)	43
----------------------------------	----

Tabella 5: Valori dei trend calcolati come pendenza delle serie annuali. Prima colonna: trend delle precipitazioni annuali delle rianalisi e delle osservazioni. Seconda colonna: trend della serie delle loro differenze. Terza colonna: trend delle differenze relative. Tabella tratta da Cavalleri et al. (2024b).

Per comprendere meglio questa differenza rispetto ai dati osservativi, sono state calcolate annualmente le differenze tra le cumulate totali delle rianalisi e quelle osservate (Figura 10). Se rianalisi e osservazioni avessero tendenze simili, ci aspetteremmo differenze relativamente piatte, con oscillazioni dovute a sovrastime e sottostime nei singoli anni. Invece, la maggior parte dei prodotti mostra un *trend* crescente nelle differenze. I valori dei *trend* nelle serie delle differenze sono riportati nella seconda colonna di Tabella 6, mentre nella terza colonna è indicato il trend percentuale rispetto al valore medio osservativo.

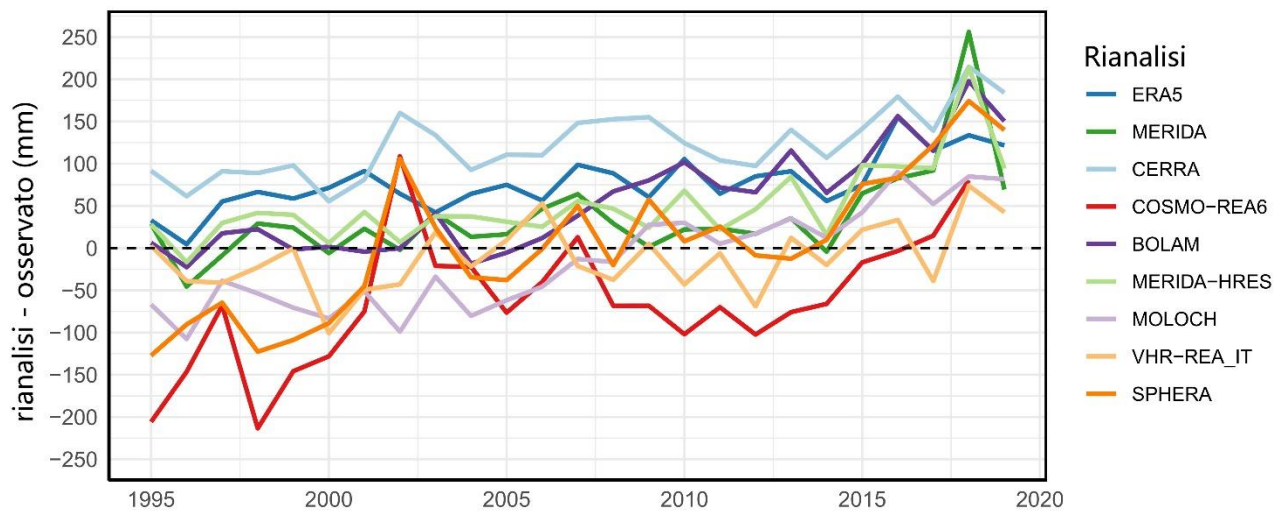


Figura 10: Andamento nel tempo delle differenze annuali della precipitazione totale mediata sul territorio italiano. Ogni colore corrisponde ad una diversa rianalisi. Figura tratta da Cavalleri et al. (2024b).

ERA5, MERIDA e CERRA mostrano una deviazione moderata del 3% per decennio, mentre MERIDA-HRES ha una tendenza del 4% per decennio. COSMO-REA6, BOLAM e MOLOCH presentano un aumento del 7% per decennio, con SPHERA che registra la crescita più elevata, oltre il 10%. VHR-REA_IT ha la variazione più bassa, pari al 2%. La tendenza varia anche in base all'area geografica (figura non mostrata), con picchi nel nord Italia. Il significato di queste analisi è che la discrepanza tra rianalisi ed osservato non è costante nel tempo: pertanto, bisogna tenere in considerazione questa incertezza quando si utilizzano le rianalisi per calcolare *trend* di precipitazione sull'Italia.

Conclusioni

In conclusione, con la crescente necessità di dataset di variabili atmosferiche su griglia, le rianalisi meteorologiche assumono un ruolo sempre più strategico. In Italia, molti di questi prodotti sono disponibili, con varie differenze nei modelli utilizzati. Confrontarli tra loro e con i dati osservativi consente di comprenderne meglio le potenzialità e le incertezze associate, rendendoli strumenti più efficaci per comprendere gli eventi estremi, supportare la transizione energetica e guidare le politiche di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici. L'analisi delle temperature ha mostrato l'abilità delle rianalisi ad alta risoluzione a cogliere le variazioni locali, nonostante un generalizzato *bias* freddo in particolare durante l'inverno. L'analisi dei campi di precipitazione ha mostrato come le scale spaziali più piccole presentino maggiori difficoltà in termini di corretto posizionamento, ed ha inoltre mostrato come molti prodotti sovrastimino le precipitazioni primaverili ed invernali soprattutto nel nord Italia. Validare le rianalisi, dunque, non è solo un esercizio accademico, ma una risposta concreta alle sfide climatiche e tecnologiche del futuro, con importanti ricadute nella ricerca e nelle applicazioni pratiche.

Dove scaricare gratuitamente alcune rianalisi meteorologiche per l'Italia:

- ERA5, ERA5-Land e CERRA: <https://cds.climate.copernicus.eu#!/home>
- COSMO-REA6: https://reanalysis.meteo.uni-bonn.de/?Download_Data__COSMO-REA6
- MERIDA e MERIDA_HRES: <https://merida.rse-web.it/>
- BOLAM e MOLOCH: <https://zenodo.org/records/14250195>
- SPHERA: <https://zenodo.org/records/10441408>
- VHR-REA_IT: <https://dds.cmcc.it/>

Ringraziamenti:

Cristian Lussana (the Norwegian Meteorological Institute), Michele Brunetti (ISAC-CNR), Riccardo Bonanno e Matteo Lacavalla (RSE).

Il dottorato di Francesco Cavalleri è stato co-finanziato con fondi PNRR (NextGeneration EU) ex DM 352 e dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico nell'ambito del Piano Triennale 2025-2027 (DM MASE n.388, 06-11-2024), in ottemperanza al DM 12 aprile 2024.

Riferimenti diretti ai lavori di validazione esposti in questo articolo:

Cavalleri et al. (2024a): Cavalleri, F., Viterbo, F., Brunetti, M., Bonanno, R., Manara, V., Lussana, C., Lacavalla, M., & Maugeri, M. (2024). Inter-comparison and validation of high-resolution surface air temperature reanalysis fields over Italy, *International Journal of Climatology*, 44(8), 2681–2700, <https://doi.org/10.1002/joc.8475>.

Cavalleri et al. (2024b): Cavalleri, F., Lussana, C., Viterbo, F., Brunetti, M., Bonanno, R., Manara, V., Lacavalla, M., Sperati, S., Raffa, M., Capeocchi, V., Cesari, D., Giordani, A., Cerenzia, IML., & Maugeri, M. (2024). Multi-scale assessment of high-resolution reanalysis precipitation fields over Italy. *Atmospheric Research*, Volume 312, 107734, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107734>

Altri riferimenti utilizzati durante il lavoro di validazione:

- Bandhauer, M., et al. (2022) Evaluation of daily precipitation analyses in E-OBS and ERA5 by comparison to regional high-resolution datasets in European regions, *Int. J. Climatol.* 42, 727–747
- Bollmeyer, C. et al. (2015) Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain, *Q J R Meteorol Soc.*, 141, 1-15.
- Bonanno, R., et al. (2019) A new high-resolution Meteorological Reanalysis Italian Dataset: MERIDA, *Q J R Meteorol Soc.*, 145: 1756-1779.
- Brunetti, M., et al. (2014), High-resolution temperature climatology for Italy: interpolation method intercomparison, *Int J Climatol*, 34: 1278-1296.
- Capecchi, V. et al. (2023) A convection-permitting and limited-area model hindcast driven by ERA5 data: precipitation performances in Italy, *Clim Dyn*, 61, 1411–1437.
- Casati, B. et al. (2004) A new intensity-scale approach for the verification of spatial precipitation forecasts, *Meteorological Applications*, 11, 141–154.
- Compo et al. (2011) The Twentieth Century Reanalysis Project, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 1-28.
- Crespi, A. et al. (2018) 1961–1990 high-resolution monthly precipitation climatologies for Italy, *Int. J. Climatol.*, 38: 878-895.
- Davolio, S. et al. (2020) The Piedmont flood of November 1994: a testbed of forecasting capabilities of the CNR-ISAC meteorological model suite, *Bull. Atmos. Sci. Technol.*, 1(3): 263–282.
- Giordani, A. et al. (2023) SPHERA, a new convection-permitting regional reanalysis over Italy: Improving the description of heavy rainfall, *Q J R Meteorol Soc.*, 149(752), 781–808.
- Hersbach et al. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Q J R Meteorol Soc.*, 146: 1999–2049.
- Isotta, F. et al. (2015) Evaluation of European regional reanalyses and downscalings for precipitation in the Alpine region, *Meteorologische Zeitschrift*, 24, 15-37.
- Kaiser-Weiss et al. (2019) Added value of regional reanalyses for climatological applications, *Environ. Res. Commun.* 1 071004.
- Lavers, D. et al. (2022) An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring, *Q J R Meteorol Soc.*, 148: 3152–3165.
- Luo et al. (2019) Assessment of ECMWF reanalysis data in complex terrain, *Int J Climatol.*, 39: 5619–5634.
- Lussana, C., Cavalleri, F., Brunetti, M., Manara, V., & Maugeri, M. (2024) Evaluating long-term trends in annual precipitation: A temporal consistency analysis of ERA5 data in the Alps and Italy, *Atmospheric Science Letters*, 25(9), e1239. <https://doi.org/10.1002/asl.1239>.
- Mitchell & Jones (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *Int. J. Climatol.*, 25, 693–712.
- Muñoz-Sabater et al. (2019) ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4349–4383.
- Rolland, C. (2003) Spatial and Seasonal Variations of Air Temperature Lapse Rates in Alpine Regions, *J. Climate*, 16, 1032–1046.
- Raffa et al. (2021) VHR-REA_IT Dataset: Very High-Resolution Dynamical Downscaling of ERA5 Reanalysis over Italy by COSMO-CLM, *Data*, 6(8).
- Schimanke S. et al. (2021) CERRA sub-daily regional reanalysis data for Europe on model levels from 1984 to present, <https://cds.climate.copernicus.eu/>.
- Viterbo, F., Sperati, S., Vitali, B., D'Amico, F., Cavalleri, F., Bonanno, R., & Lacavalla, M. (2024) MERIDA HRES: A new high-resolution reanalysis dataset for Italy, *Meteorological Applications*, 31(6), <https://doi.org/10.1002/met.70011>
- Velikou et al. (2022) Reliability of the ERA5 in Replicating Mean and Extreme Temperatures across Europe, *Water*, 14, 543.