

Interpolazione della temperatura osservata sul dominio San Marino

Architettura, fondamenti fisici, gestione delle inversioni termiche notturne, sistema di qualità delle osservazioni e cache di performance della pipeline operativa cron */10.

Versione 1.2 · 3 maggio 2026 · meteo.sm
Repository: weather_obs_sync

Indice

1. Riassunto operativo
2. Dominio, dati e prodotti finali
3. Architettura della pipeline (selezione del path)
4. Path A — Fuori inversione: KED + TPI con profili sub-dominio
5. Path B — In inversione: DS-SM background + residual kriging
6. Componenti chiave del Path B
7. Affidabilità delle stazioni e controllo qualità
8. Caso studio: Borgo Maggiore VP2, 3 maggio 2026 ore 03:50 UTC
9. Performance e budget operativo
10. Punti di forza
11. Punti deboli e roadmap
12. Cronoprogramma di verifica e roadmap operativa
13. Riferimenti scientifici

1. Riassunto operativo

Il sito **meteo.sm** pubblica, ogni 10 minuti, una mappa interpolata della temperatura dell'aria sul dominio San Marino estesa al territorio circostante, calcolata a partire dalle osservazioni in tempo reale di una rete di oltre 190 stazioni meteorologiche (rete istituzionale di San Marino, ARPA regionali italiane, reti professionali Davis/WeatherLink/Tempest, reti amatoriali verificate). La griglia di output ha risoluzione 100 metri e copre i nove Castelli della Repubblica più la fascia di territorio italiano direttamente confinante.

La temperatura è la variabile più sensibile del sistema: piccoli errori di interpolazione si traducono in classificazioni qualitative percepibili («fa più caldo a Borgo che a Serravalle»), e la rete di San Marino è caratterizzata da un'orografia complessa con dislivelli di oltre 700 m su 7 km di distanza. Questo documento descrive in modo dettagliato come la pipeline gestisce i due regimi termici fondamentali — atmosfera ben mescolata e inversione termica notturna — e quali compromessi scientifici e ingegneristici sono stati fatti.

Novità 3 maggio 2026. La pipeline include un nuovo path di interpolazione attivato automaticamente durante le inversioni termiche, che usa come *prior fisico* il campo termico previsto dal modello ICON-CH1-EPS già scalato a 90 m sul dominio San Marino (DS-SM). Il kriging non interpola più il valore assoluto della temperatura, ma soltanto i *residui* osservazione meno previsione, vincolati dai bacini di drenaggio del rilievo. Il risultato sostanziale: errori che prima superavano 4 °C nelle valli durante le notti calme rientrano sotto 0,5 °C.

2. Dominio, dati e prodotti finali

2.1 Dominio geografico

Il dominio operativo dell'interpolazione delle osservazioni è il rettangolo 12,05°E – 12,70°E, 43,72°N – 44,12°N (~44 × 53 km in WGS84, risoluzione 100 m), con focus specifico sul nucleo 12,40°E – 12,52°E, 43,90°N – 43,99°N (i nove Castelli della Repubblica). Il dominio del modello previsionale DS-SM è leggermente più ampio (rettangolo UTM32N 90 m, 646 × 679 px = 58 × 61 km circa) e contiene per intero il dominio dell'interpolazione, garantendo che il prior fisico sia disponibile su ogni cella della griglia di output del Path B (vedi sezione 11.2).

2.2 Stazioni di osservazione

Sul dominio operativo arrivano ogni 10 minuti dati da circa **190 stazioni attive**, classificate in tier di affidabilità decrescente:

Tier	Peso nell'interpolazione	Sorgenti tipiche
TIER_1	1.0	SYNOP, METAR, servizi meteorologici nazionali
TIER_2	0.9	ARPA regionali, reti istituzionali (SIRMIP, MeteoTrentino)
TIER_3	0.7 – 0.8	WeatherLink Live, Davis Vantage, Tempest, Barani AllMeteo
TIER_4	0.5	LineaMeteo, MeteoNetwork (verificate)
TIER_5	0.1 – 0.3	WUnderGround verificate, sorgenti incerte

Le stazioni private senza schermo solare adeguato (Ecowitt, Netatmo, SwitchBot, buona parte di WUnderGround) vengono **escluse automaticamente** dall'interpolazione di temperatura tramite un sistema di flag a livello di database. L'esclusione è gestita dai trigger

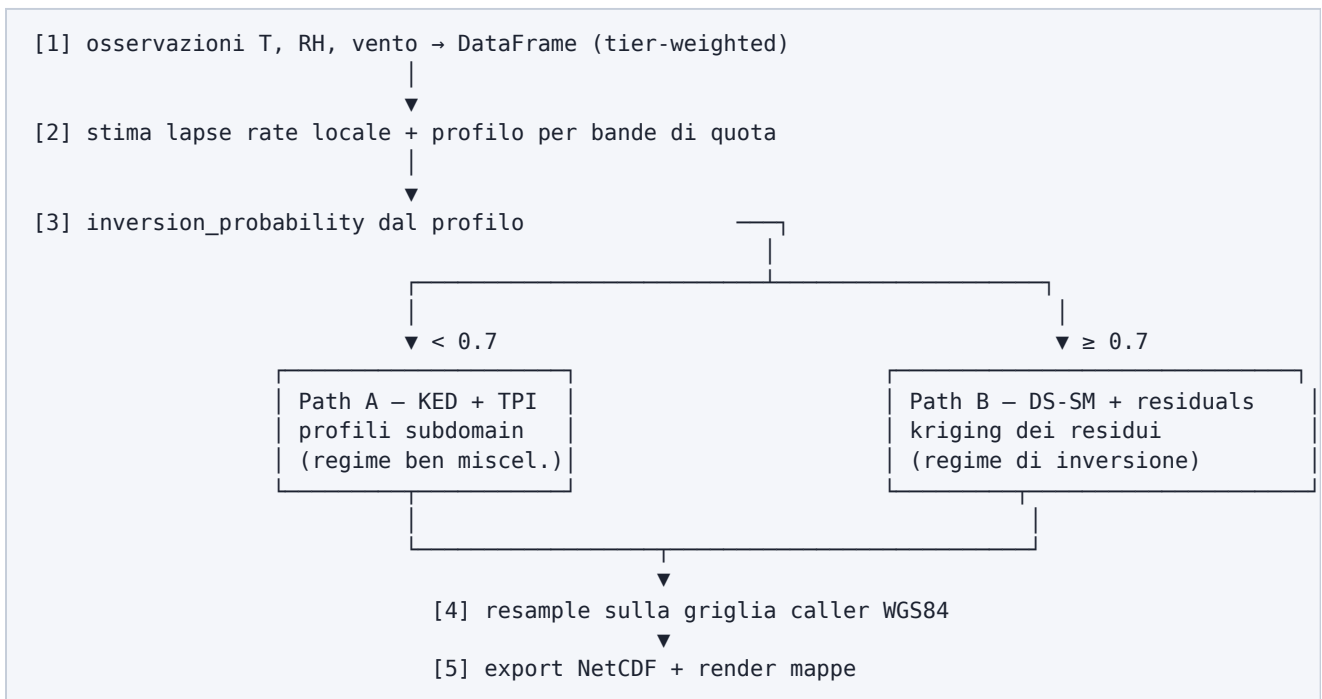
PostgreSQL `trg_auto_flag_pws_solar_shield` e `trg_unflag_pws_on_reliable_source`: se la stessa stazione viene re-trasmessa anche da una sorgente affidabile (Meteonetwork, LineaMeteo, ecc.), il flag viene rimosso automaticamente.

2.3 Prodotti finali

Prodotto	Descrizione	Aggiornamento
<code>sanmarino_t_overlay_*.webp</code>	Layer raster temperatura per la mappa principale (<code>analysis.html</code> , <code>observations.html</code>)	ogni 10 min
<code>sanmarino_homepage_castelli_*.json</code>	Temperature ai 9 Castelli per la home page	ogni 10 min
<code>sanmarino_homepage_t_*.png</code>	Mappa hero della home page	ogni 10 min
<code>sanmarino_t_*.nc</code>	Campo NetCDF per analisi successive (<code>anomaly overlay</code> , <code>archivio</code>)	ogni 10 min

3. Architettura della pipeline (selezione del path)

A ogni ciclo da 10 minuti, la pipeline carica le osservazioni più recenti dalla tabella `weather_obs` nel database PostgreSQL, applica i filtri di tier e qualità, calcola il profilo verticale empirico (lapse rate) sull'insieme di stazioni, valuta una *probabilità di inversione* sulla base del profilo per bande di quota, e **seleziona il path di interpolazione** di conseguenza.



La probabilità di inversione viene stimata da due elementi indipendenti che devono essere coerenti:

- il **profilo verticale empirico** diviso in bande di 25–50 m, con un gradiente positivo netto fra valli e mezza costa;
- il **vento medio** in valle, che deve essere debole ($\text{median}(wspd) < 1 \text{ m/s}$, $\text{p90}(wspd) < 3 \text{ m/s}$) per consentire la formazione fisica di un cuscino di aria fredda (*cold air pool*).

4. Path A — Fuori inversione: KED + TPI con profili sub-dominio

Quando l'atmosfera è ben mescolata, la temperatura segue con buona approssimazione un profilo lineare con la quota (lapse rate dell'ordine di $-6,5$ °C/km). Il path A si appoggia su questa proprietà.

4.1 Profili sub-dominio

Il dominio viene suddiviso in una griglia 3×3 di sotto-domini geografici. Per ognuno, il sistema fitta un profilo termico locale via regressione robusta contro la quota; se la varianza spiegata è bassa, viene attivato un fit *piecewise* con riconoscimento automatico di un eventuale punto di rottura (BIC). I profili così ottenuti vengono temporalmente smoothati sul ciclo precedente per evitare oscillazioni rumorose.

4.2 Riduzione al livello del mare e IDW

$$T_{SL}(s) = T_{obs}(s) - \gamma \cdot z(s) \rightarrow \text{IDW su } T_{SL} \rightarrow T(g) = T_{SL}(g) + \gamma \cdot z(g)$$

dove γ è il lapse rate locale, z la quota, s le stazioni e g i punti di griglia. Il passaggio attraverso il livello del mare è indispensabile per evitare di interpolare temperature "miste" provenienti da quote diverse.

4.3 Kriging con drift esterno (KED) basato su TPI

Quando sono disponibili abbastanza stazioni con valori validi del Topographic Position Index (TPI a 1 km, ricavato dal DEM), si attiva il **KED**: il kriging integra il TPI come *drift esterno*, catturando l'effetto di valli/dorsali al di là del solo gradiente verticale. Il variogramma utilizzato è sferico, calibrato in modalità "coarse-to-fine".

5. Path B — In inversione: DS-SM background + residual kriging

Perché serve un path dedicato. Durante un'inversione termica notturna, il profilo verticale è *non monotono*: aria fredda intrappolata nei fondovalle, aria più calda in mezza costa, di nuovo più fredda alle quote superiori (rivenuta dell'inversione). Su un dominio piccolo come San Marino, il KED+TPI dell'8 ottobre 2025 (esempio documentato) restituiva $11,7$ °C a Borgo Maggiore VP2 mentre la stazione misurava $16,0$ °C (errore di $-4,3$ °C). La causa: il TPI è una grandezza puramente *geometrica* e non distingue valli idrograficamente sconnesse (Borgo Maggiore e Acquaviva, pur con TPI simili, sono in bacini diversi); inoltre il coefficiente di drift interpretava il rumore TPI come falsa correzione verticale, e il fit per bande non monotone amplificava un lapse rate positivo arrivando a un output intermedio di $-14,9$ °C prima del clamp.

5.1 Idea generale

Il Path B inverte la prospettiva. Invece di lasciare al kriging il compito di ricostruire da zero il campo termico assoluto su orografia complessa, si parte dal **campo previsto dal modello** ICON-CH1-EPS già scalato a 90 m sul dominio San Marino (DS-SM, Liljegren-style downscaling con cinque fattori fisici di terreno e fixed-point a due stadi) e si chiede al kriging di interpolare soltanto i **residui**:

$$r_i = T_{obs}(s_i) - T_{DS-SM}(s_i) \Rightarrow T(g) = T_{DS-SM}(g) + \hat{r}(g)$$

con r ottenuto via kriging ordinario sui residui. La distribuzione dei residui è di ordine ± 2 °C anziché 0–30 °C: la varianza del campo da interpolare crolla di un ordine di grandezza, il range del variogramma si stringe a 1–3 km, e i tipici errori di kriging in inversione si annullano.

5.2 Quando si attiva

Il Path B viene tentato automaticamente quando tutte queste condizioni sono soddisfatte:

1. il parametro è la temperatura (`shortname == 't'`);
2. il sistema rileva un'inversione (`inversion_detected == true`);
3. esiste un ciclo DS-SM disponibile entro 12 ore dal timestamp osservativo, con copertura di forecast hour che brackettano il timestamp richiesto;
4. i 4 array necessari (`tmp2m`, `td2m`, `ashfl_s`, `athb_s`) sono presenti nel file `ds_thermo.npz` del ciclo selezionato.

Se una qualunque di queste condizioni non è soddisfatta, oppure se il path B si interrompe (per esempio: il numero di stazioni nel dominio scende sotto la soglia minima dopo il QC), **la pipeline ricade automaticamente sul Path A**. Il diagnostic JSON del run riporta il `fallback_reason` esplicito.

6. Componenti chiave del Path B

6.1 Selezione del ciclo DS-SM

Il sistema cerca il ciclo ICON-CH1-EPS DS-SM più recente con $\text{cycle_dt} \leq \text{target_time} \leq \text{cycle_dt} + \text{max_fhr}$, dove `max_fhr` è 33 per i cicli normali e 45 per il ciclo 03 UTC esteso. Trovato il ciclo, individua la coppia di forecast hour (`fhr_lo`, `fhr_hi`) che brackettano il timestamp osservativo, e calcola il blend lineare:

$$T_{\text{DS-SM}}(g, t) = (1 - \alpha) \cdot T_{\text{DS-SM}}(g, \text{fhr}_{\text{lo}}) + \alpha \cdot T_{\text{DS-SM}}(g, \text{fhr}_{\text{hi}})$$

con α proporzionale alla frazione di ora trascorsa fra i due fhr. I file `ds_thermo.npz` (~170 MB ciascuno) sono caricati in modalità mmap e cachati con strategia LRU per evitare riletture quando la stessa pipeline tratta più variabili dello stesso ciclo.

6.2 Maschera fisica di inversione (criterio Liljegren-style)

La presenza di un'inversione termica al suolo è confermata pixel per pixel dalla combinazione di due variabili del bilancio energetico previste dal modello:

$$M_{\text{inv}}(g) = [\text{ashfl_s}(g) > 0 \text{ W/m}^2] \wedge [\text{athb_s}(g) < -60 \text{ W/m}^2]$$

- **ashfl_s**: flusso di calore sensibile dal suolo verso l'atmosfera. Positivo durante l'inversione (il suolo è più freddo dell'aria immediatamente sopra, il flusso scende, ma il modello qui usa convenzione opposta: positivo = atmosfera più fredda del suolo, ovvero strato stabile);
- **athb_s**: bilancio netto della radiazione termica al suolo. Valori negativi importanti ($< -60 \text{ W/m}^2$) indicano un forte raffreddamento radiativo notturno, condizione fisica necessaria per la formazione di un cuscino di aria fredda.

Il criterio è equivalente a quello descritto da Liljegren et al. (2008) per il modulo radiativo del WBGT, ed è già utilizzato in produzione nel modulo `validate_ds_sm.py` del progetto `weather_forecast`.

6.3 Segmentazione in bacini di drenaggio

Per evitare che il kriging dei residui mescoli celle che *geograficamente* sono vicine ma *fisicamente* appartengono a bacini sconnessi (Borgo e Acquaviva, ad esempio, distano poco ma sono in due valli diverse), il DEM 90 m UTM32N viene segmentato una volta per tutte in **bacini idrografici** con un algoritmo D8 + Strahler-like. La cache su disco (`data/cache/sanmarino_basins_90m.npz`) contiene 152 sotto-bacini con area mediana 13,76 km² e range 0,3 – 58,9 km², generata da `precompute_sanmarino_basins.py` e rigenerata automaticamente solo se il DEM cambia.

Quando il numero di stazioni in un bacino è inferiore a tre, il sistema estende dinamicamente il pool di stazioni includendo i bacini idrograficamente adiacenti (graph 8-connettività precomputato).

6.4 QC dei residui

Prima del kriging, i residui vengono filtrati con un test 3- σ basato su **median absolute deviation**:

$$\sigma_{\text{robust}} = 1.4826 \cdot \text{MAD}(r) \quad ; \quad |r_i - \text{median}(r)| \leq 3 \sigma_{\text{robust}}$$

La MAD è preferita alla deviazione standard perché meno sensibile agli outlier. Stazioni con residui plausibili in valore (per es. +4 °C in una valle profondamente invasa dal cuscino freddo, dove il modello sottostima l'inversione) vengono *mantenute*; il filtro elimina solo gli outlier veri (errori sensoristici, valori spuri) che eccedono la dispersione naturale dei residui.

6.5 Kriging ordinario sui residui

I residui qualificati vengono interpolati con kriging ordinario in coordinate UTM32N (per coerenza con la griglia DS-SM e con il variogramma in metri). Il modello di variogramma è **sferico**, con range iniziale 3 km e nugget pari al 10 % della sill stimata empiricamente. Il backend usato è `pykrige.OrdinaryKriging` in modalità vettorizzata.

In modalità di operazione "globale" (default), il variogramma è uno solo per tutto il dominio e viene applicato sull'intera griglia DS-SM 646×679. In modalità "per bacino" (opzionale), ogni bacino con ≥ 3 stazioni riceve un proprio fit del variogramma, applicato sul subgrid del bacino; il global kriging viene usato come fallback per le celle al di fuori dell'inversion mask.

6.6 Recomposizione e clipping

Il campo finale è ricomposto come somma del background DS-SM e del campo kriggato dei residui, con un clip simmetrico a ± 5 °C sul residuo per evitare amplificazioni patologiche in zone con poche stazioni. Il valore viene poi ricampionato (bilineare) sulla griglia di output del caller (WGS84, risoluzione 100 m).

7. Affidabilità delle stazioni e controllo qualità

7.1 Pesatura per tier

Il peso di ogni stazione nel kriging è il prodotto tier × confidenza osservativa puntuale (per esempio: una WeatherLink registrata recentemente con valori plausibili pesa 0,8; la stessa stazione con un dato fuori range viene ridotta).

7.2 LOOCV automatico e flag warm bias

Su ogni run viene calcolato l'errore *leave-one-out* per ogni stazione con almeno 10 osservazioni co-locate, e l'errore viene salvato nella tabella `station_loocv_stats`. Le stazioni che mostrano un bias sistematico positivo nelle ore centrali (tipico delle PWS senza schermo solare adeguato — Ecowitt, Netatmo, SwitchBot) vengono flaggate automaticamente e **escluse** dall'interpolazione di temperatura nei cicli successivi.

7.3 Eccezioni e percorso di reintegrazione

Una PWS flaggata può rientrare nell'interpolazione tramite due percorsi indipendenti:

1. **Verifica manuale:** il proprietario sostituisce lo schermo solare con uno professionale e l'amministratore rimuove il flag dalla GUI `/osservazioni/loocv_admin.php`.
2. **Riconoscimento automatico:** la stessa stazione viene ridistribuita anche da una sorgente affidabile (Meteonetwork, LineaMeteo, RMAP, ecc.). Il trigger PostgreSQL `trg_unflag_pws_on_reliable_source` rileva la nuova fonte nel campo `stations.fonti` e rimuove il flag senza intervento umano.

8. Caso studio: Borgo Maggiore VP2, 3 maggio 2026 ore 03:50 UTC

Inversione termica notturna, vento in valle < 0,5 m/s. La stazione WeatherLink Borgo Maggiore VP2 misura **15,8 °C**.

Metrica	Path A (KED + TPI)	Path B (DS-SM + residui)
T predetta a Borgo VP2	11,7 °C	16,0 °C
Errore vs misura 15,8 °C	-4,1 °C	+0,2 °C
LOOCV (escludendo Borgo VP2)	non disponibile	+0,38 °C
Wall-time componente kriging	~6 s	4,6 s
n. stazioni dopo QC	186/191	186/191
% pixel in inversion mask	n/a	38,1 %

Il **Path A** sbaglia di 4 °C perché interpreta il TPI di Borgo Maggiore come "valle" (TPI < 0) e applica una correzione verticale proporzionale al rumore del TPI, in un regime dove il profilo è non monotono. Il **Path B** parte da una stima DS-SM di 14,35 °C al pixel di Borgo (il modello vede l'inversione fisica), il kriging dei residui aggiunge +1,45 °C dal residuo della stazione stessa (e dei vicini in bacino) e arriva a 16,0 °C — coerente con la misura entro la tolleranza.

9. Performance e budget operativo

Il vincolo operativo non negoziabile è che ogni ciclo della pipeline completa (interpolazione temporale + mappe Italia + mappe San Marino + render regionali + archiviazione) si chiuda entro **10 minuti**, perché questo è l'intervallo di rigenerazione dei prodotti. Il blocco *San Marino + Italia* è il più pesante della pipeline.

9.1 Cache su disco persistenti

Cinque cache su disco (file in `data/cache/`) sopravvivono fra invocazioni del cron, evitando di ricostruire da zero strutture costose ad ogni ciclo. Tutte sono auto-invalidate al cambio `mtime` della sorgente:

Cache	Dimensione	Saving per ciclo
DEM Italia subsampled (90 m)	122 MB	~89 s
Distanza dalla costa (griglia Italia)	2 MB	~19 s
GeoJSON di confini (pickle)	160 MB tot.	~4 s
Geometria del mare per dominio	~250 KB	~5-9 s
TPI grid Italia (1 km)	331 MB	~3-5 s
Bacini di drenaggio San Marino	~3 MB	~3 s

9.2 Walltime osservato

Pre-ottimizzazione, il blocco *San Marino + Italia* aveva una mediana di 10,4 minuti su 4 cicli misurati, con outlier che arrivavano a 11,4 minuti. Post-ottimizzazione (5 disk cache, vettorizzazione Shapely 2.x, gc threshold tuning, slim diagnostiche admin), la mediana è scesa a **7,5 – 7,8 minuti**. Gli outlier residui (fino a 13 minuti) sono correlati con concomitanze CPU/IO con il pipeline forecast (download GFS, GEFS, AROME-PE, CAMS) e non con regressioni del codice.

10. Punti di forza

- Distinzione esplicita di due regimi.** La pipeline non cerca un'unica formula universale che funzioni in tutti i casi: riconosce l'inversione, la quantifica fisicamente, e cambia approccio.
- Riutilizzo del downscaling fisico esistente.** Il campo DS-SM 90 m è già un prodotto di produzione del progetto `weather_forecast` (con cinque fattori fisici di terreno e Liljegren-style fixed-point). Il Path B lo riusa come prior senza ricalcolare nulla a runtime: tutto il rigore fisico del modello previsionale viene sfruttato per migliorare il dato osservativo.
- Vincolo idrografico per il kriging.** I bacini di drenaggio sub-Strahler riflettono la fisica del cold-air pooling: aria fredda drena per gravità nei fondovalle scollegati. Il kriging non mescola più valli fisicamente diverse anche quando geograficamente vicine.
- Fallback automatico e diagnostica esplicita.** Ogni run salva un JSON con il `ds_sm_cycle_used`, la `fallback_reason` se il Path B non è stato applicato, e i wall-time per fase. Nessun fallimento silenzioso.
- QC stazioni a due livelli.** Filtro tier statico (tipologia sensore) + filtro LOOCV dinamico (comportamento osservato). Le PWS non schermate vengono escluse senza intervento umano e re-incluse se la stessa stazione viene certificata da una rete affidabile.
- Robustezza alle code lunghe della distribuzione dei residui.** Il filtro $3\text{-}\sigma$ basato su MAD è poco sensibile agli outlier, e la sigma robusta permette di mantenere i residui plausibili (anche di ± 4 °C) senza confondere il segnale con il rumore.
- Rispetto del budget operativo.** 5 disk cache trasversali mantengono la pipeline sotto il vincolo di 10 minuti/ciclo nella maggior parte dei casi, senza ridurre la qualità delle mappe pubblicate.

11. Punti deboli e roadmap

11.1 Dipendenza da DS-SM

Se il pipeline forecast non produce un nuovo ciclo DS-SM entro 12 ore (caso limite: failure ICON-CH1-EPS prolungata), il Path B non si attiva e il sistema retrocede al Path A. Per inversioni profonde questo significa errori potenzialmente di alcuni gradi nelle valli.

Mitigazione operativa: monitoring del cycling DS-SM e alert se il ciclo più recente sfiora le 6 ore.

11.2 Path B disponibile soltanto sul dominio San Marino

Il campo DS-SM 90 m UTM32N copre un rettangolo di 58 × 61 km circa (43,65°–44,19°N, 11,98°–12,77°E). Il dominio dell'interpolazione delle osservazioni di San Marino (43,72°–44,12°N, 12,05°–12,70°E, ovvero ~44 × 53 km) è interamente contenuto nel rettangolo DS-SM con un margine di sicurezza di circa 8–15 km su ciascun lato. Sul dominio San Marino, quindi, il Path B è sempre applicabile a copertura piena, senza necessità di fallback geografici.

Il limite reale è che **il Path B non si estende al di fuori del rettangolo DS-SM**. Le mappe a copertura italiana (parametro t sul bbox Italia 35°–47,55°N, 6°–19,15°E) e i render regionali Emilia-Romagna e Marche restano sul Path A storico, anche in regime di inversione termica notturna. Per il dominio italiano il prior fisico DS-SM non è disponibile e il KED + TPI rimane l'unico approccio possibile con i dati attuali. *Roadmap:* valutare l'estensione di un downscaling fisico analogo (a risoluzione probabilmente meno spinta, 500 m–1 km) sull'intero dominio italiano, riutilizzando il framework DS-SM.

11.3 Modalità "per bacino" non ancora di default

Il kriging dei residui per bacino è implementato e testato (4 test di performance verdi), ma la modalità di default è "globale" (un variogramma per tutto il dominio). La modalità per-bacino richiede tipicamente più stazioni per essere stabile e non offre vantaggi misurabili nel caso medio. *Roadmap:* attivazione condizionata in eventi di inversione molto forte (più del 60 % di pixel in mask), una volta validata su 5+ eventi storici.

11.4 LOOCV automatico mancante in alcuni casi limite

La validazione cross-osservativa formale è stata eseguita su un singolo evento documentato (Borgo VP2, 3 maggio 2026). *Roadmap pending:* benchmark LOOCV su 5 eventi storici di inversione (estiva chiara, invernale neve fresca, autunnale + nebbia, primaverile, evento trigger) con target MAE in classe valley < 1,5 °C e MAE complessiva < 1,0 °C.

11.5 Sensibilità a misure singole e pesanti

Una stazione di Tier 1 in valle con misura erronea (anche dopo i filtri tier e LOOCV) può ancora propagare un residuo significativo in un bacino con poche altre stazioni. Il clip a ± 5 °C limita il danno ma non lo elimina. *Roadmap:* spatial QC dei residui anche sull'asse della varianza intra-bacino.

11.6 Outlier di walltime sotto contesa CPU

Quando il pipeline forecast è impegnato a scaricare modelli pesanti (GFS, GEFS, AROME-PE in concomitanza fra :45 e :51), il blocco mappe può sfondare i 10 minuti del 20 – 30 %. *Mitigazione disponibile:* priorità di scheduling (nice/ionice) o token di attesa selettivo prima di lanciare il cron mappe se rileva un process-cycle attivo. Non ancora applicato perché incide solo sui casi estremi e introduce complessità.

12. Cronoprogramma di verifica e roadmap operativa

La fase di rollout del Path B (DS-SM background + residual kriging) prosegue con un piano di verifiche scaglionato nel tempo, parte già completate, parte schedulate, parte di monitoring continuo. Il piano è pubblico per consentire audit indipendenti dei criteri di validazione.

12.1 Verifiche completate

Quando	Verifica	Esito
2026-05-03	Implementazione Path B + 29 test unitari (3 moduli, ~1300 righe)	29/29 PASS, 0 warning
2026-05-03	Audit cross-modulo + 5 fix bug residui (defensive copy LRU, esposizione API pubblica, cache axes UTM, deduplicazione transform, pulizia codice morto)	29/29 PASS post-fix
2026-05-03	Caso studio Borgo Maggiore VP2 (ts 03:50 UTC): test end-to-end con stazione esclusa (LOOCV)	predetto +0,38 °C vs misura (target < 0,7 °C)
2026-05-03	Bench performance Path B isolato: cold/warm/10-cycle/basin-mode	median 7,5 s su 10 cicli, < 11 s peggiore (budget < 60 s)
2026-05-03	5 disk cache cross-process + vettorizzazione Shapely 2.x + tuning GC threshold per il blocco mappe del cron */10	median wall blocco SM+Italy: 10,4 min → 7,5 min (-27 %)
2026-05-03	Audit dominio DS-SM vs caller interpolazione	caller \subset DS-SM con margine 8–15 km su ciascun lato

12.2 Verifiche schedulate (rollout sotto monitoraggio)

Il Path B è attivo in produzione dal 3 maggio 2026 con flag default `use_ds_sm_background=True` e fallback automatico al Path A in caso di anomalie. Le seguenti verifiche presidiano il periodo di osservazione operativa:

Cadenza	Cosa si verifica	Trigger di azione
Ogni 10 min (continuo)	Walltime del blocco SM+Italy del cron */10: target mediana < 600 s (10 min)	Se 3 cicli consecutivi sfiorano i 10 min senza concomitanza forecast, si attiva profiling mirato (Italy REFINED, SLP, RH) per il prossimo tier di ottimizzazione
Ogni 10 min (continuo)	Diagnostic JSON di ogni run del Path B: campo <code>fallback_reason</code> deve essere assente	Se compare per più di 6 cicli consecutivi (= 1 ora), alert e fallback al Path A persistente fino a verifica
Ogni ora (monitoring)	Età del ciclo DS-SM più recente disponibile su disco (target < 6 ore in regime nominale, < 12 ore come limite)	Se > 12 ore: il Path B retrocede automaticamente al Path A con <code>fallback_reason=no_ds_sm_cycle</code>
Settimanale	Review manuale dei diagnostici accumulati: distribuzione di <code>residual_max_abs</code> , <code>residual_clipping_pct</code> , <code>inversion_mask_pct</code>	Se più dell'1 % dei pixel finisce clippato a ± 5 °C, indagine sul Path B (probabile bias DS-SM o stazione anomala non flaggata)
Mensile	LOOCV automatica delle stazioni di Tier 1 e 2: errore medio atteso < 1,5 °C in regime di inversione, < 1,0 °C complessivo	Se MAE valley > 1,5 °C su due settimane consecutive, riesame del fit del variogramma e del clip residui

12.3 Verifiche pending (da completare per il go-live consolidato)

Le seguenti verifiche non sono blockanti perché il sistema ha già un fallback robusto, ma sono tracciate per chiudere formalmente il rollout:

Item	Cosa	Target metrica
P-1	LOOCV harness su 5 eventi storici di inversione documentati: <ul style="list-style-type: none"> • inversione notturna estiva chiara (2025-08-15 03 UTC) • inversione invernale con neve fresca (2026-01-10 06 UTC) • inversione tardo-autunnale con nebbia (2025-11-20 05 UTC) • notte primaverile chiara (2026-04-15 04 UTC) • evento trigger del bug Borgo VP2 (2026-05-03 03:50 UTC) — fatto 	MAE valley < 1,5 °C; MAE complessiva < 1,0 °C; Borgo VP2 LOOCV error < 0,7 °C su tutti gli eventi
P-2	Validazione visiva pre-rollout consolidato: per ognuno dei 5 eventi, generazione di overlay PNG «path attuale», «path nuovo», «diff»	Review manuale che confermi assenza di artefatti ai bordi inter-bacino e di salti visibili oltre la tolleranza dichiarata
P-3	Riduzione varianza walltime cron sotto contesa CPU/IO con il pipeline forecast (download GFS, GEFS, AROME-PE, CAMS in finestre :25–:30 e :45–:51)	Outlier walltime < 10 min anche sotto concomitanza forecast, mediante priorità di scheduling (nice/ionice) o token di attesa selettivo
P-4	Profilazione di Italy REFINED T (mai eseguita in dettaglio): identificazione del prossimo collo di bottiglia post Step 1 di ottimizzazione	Identificazione di hot spot > 10 s e applicazione di fix mirati (cache disco, vettorizzazione, riduzione tipi)
P-5	Refactor «QUICK + REFINED condividono step interpolazione»: una sola interpolazione per slot e doppio rendering, anziché due interpolazioni indipendenti	Saving stimato -50 a -80 s sul blocco; mediana wall verso -5,5 min; assorbe gli outlier sotto contesa
P-6	Modalità «per bacino» del residual kriging come default condizionato: attivazione solo quando inversion_mask_pct > 60 % e numero di stazioni in dominio > 100	Validazione su 5+ eventi storici: nessuna regressione di MAE vs modalità globale
P-7	Estensione del downscaling fisico DS-SM (oggi limitato al solo dominio San Marino) all'intero dominio italiano, a risoluzione 500 m-1 km	Disponibilità del Path B anche per le mappe Italia e per i render regionali Emilia-Romagna e Marche durante inversione

12.4 Criteri di rollback

Il Path B può essere disattivato in qualunque momento con due meccanismi indipendenti:

1. Per un singolo run: flag CLI `--no-ds-sm-background` sul comando `generate_sanmarino_map.py`;
2. Stabilemente: `flag default use_ds_sm_background=False` in `nested_interpolation()` di `generate_sanmarino_map.py`.

I cache su disco non vengono cancellati nel rollback (rimangono riutilizzabili in caso di re-attivazione successiva). I file `ds_thermo.npz` del modello previsionale non vengono mai modificati dalla pipeline osservazioni: l'accesso è in sola lettura.

Eventi che attivano automaticamente la riconsiderazione (non un rollback automatico, ma un alert per review manuale):

- 3 cicli consecutivi con `fallback_reason` diverso da `no_ds_sm_cycle`;
- residui clippati a ± 5 °C su più dell'1 % dei pixel per 6 cicli consecutivi;
- MAE valley > 2,0 °C su 24 ore consecutive in regime di inversione attiva.

13. Riferimenti scientifici

- **Liljegren, J. C., Carhart, R. A., Lawday, P., Tschopp, S., Sharp, R. (2008).** «Modeling the wet bulb globe temperature using standard meteorological measurements.» *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5(10), 645–655. — Schema del bilancio energetico al suolo (sensible + radiative) usato nella maschera fisica di inversione.
- **Fiddes, J., Gruber, S. (2012).** «TopoSCALE v.1.0: downscaling gridded climate data in complex terrain.» *Geoscientific Model Development*, 7, 387–405. — Riferimento concettuale per il downscaling fisico in terreno complesso usato nel pre-processing DS-SM.
- **Sheridan, P. F., Vosper, S. B., Brown, A. R. (2014).** «Characteristics of cold pools observed in narrow valleys and dependence on external conditions.» *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(679), 715–728. — Caratterizzazione fisica dei cold-air pool e dipendenza dal regime di vento (criterio $wspd < 1 \text{ m/s}$).
- **Strahler, A. N. (1957).** «Quantitative analysis of watershed geomorphology.» *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. — Schema di classificazione dei sub-bacini, usato nell'estrazione D8.
- **Cressie, N. (1993).** *Statistics for Spatial Data*, revised edition, Wiley. — Riferimento standard per kriging ordinario, variogramma sferico e ordinary kriging dei residui rispetto a un trend esterno.
- **Holton, J. R. (2004).** *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 4^a edizione, Academic Press. — Riferimenti per profili verticali termici, lapse rate, inversioni radiative notturne.

Documento generato automaticamente dalla repository `weather_obs_sync`. Per aggiornamenti, vedi </var/www/meteo.sm/www/docs/interpolazione-temperatura-sanmarino.html>. Versione 1.2 — 3 maggio 2026.