

# SMART - DEBRIS FLOW EARLY WARNING SYSTEM

DELIVERABLE 1.2

ALGORITMI DI ASSIMILAZIONE DELLE  
PRECIPITAZIONI



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani  
PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



## Sommario

<i>1. INTRODUZIONE.....</i>	<i>3</i>
<i>2. SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI DA PLUVIOMETRI.....</i>	<i>5</i>
<i>3. SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI DA RADAR.....</i>	<i>6</i>
3.1 SISTEMA DI ACQUISIZIONE, PRE-ELABORAZIONE E ARCHIVIAZIONE.....	6
<i>4. NOWCASTING DELLE PRECIPITAZIONI.....</i>	<i>7</i>
4.1 IDENTIFICAZIONE DI SOFTWARE OPEN-SOURCE PER IL NOWCASTING.....	7
4.2 VERIFICA DELL'UTILIZZO DEL TOOL PYSTEPS IN S-DEWAS.....	7
4.3 VERIFICA E VALIDAZIONE DEGLI ALGORITMI DI NOWCASTING.....	11
4.4 IMPLEMENTAZIONE OPERATIVA DI PYSTEPS IN S-DEWAS.....	19
<i>5. INPUT PLUVIOMETRICO AL MODELLO IDROMORFOLOGICO.....</i>	<i>21</i>

## Elenco Tabelle

<i>Tabella 1 - Esempio di tabella di contingenza.....</i>	<i>12</i>
---	-----------

## 1. INTRODUZIONE

S-DEWAS (Smart-Debris flow Early Warning System) è un progetto di ricerca e sviluppo condotto dalle aziende CISMA srl (CUP: I59J24000260006) e MOUNTAIN-EERING srl (CUP: I59J24000270006) nell'ambito del programma di ricerca del consorzio "iNEST - Interconnected North-East Innovation Ecosystem", a valere sulle risorse del Piano Nazionale per la Ripresa e Resilienza (PNRR, Missione 4 Componente 2, Investimento 1.5 D.D. 1058 23/06/2022, ECS\_00000043 – Spoke1, RT1B) per la creazione e il rafforzamento di "ecosistemi dell'innovazione per la sostenibilità", finanziato dall'Unione Europea Next-GenerationEU.

CISMA (Capogruppo) e MOUNTAIN-EERING sono società di ingegneria altamente tecnologiche ed innovative, insediate presso il parco tecnologico NOI Techpark di Bolzano. Entrambe le aziende operano da anni nel settore ambientale, con un particolare focus sui fenomeni atmosferici e sui processi idrogeologici che si sviluppano in ambienti montani.

CISMA è nata nel 2005 ed è specializzata nel settore dell'analisi di dati ambientali e della meteorologica applicata. Ha un'eccellente know-how nel campo della modellistica numerica fisicamente basata dei fenomeni atmosferici (previsioni meteorologiche e dispersione degli inquinanti) e nello sviluppo di catene modellistiche implementate ad-hoc per far fronte a diversi problemi ambientali. CISMA collabora da anni con l'Università di Trento nell'ambito di progetti di ricerca applicata per il monitoraggio della qualità dell'aria e nella valutazione della dispersione al suolo degli inquinanti. Tra i vari progetti è stata partner del progetto Life BrennerLec, in cui ha contribuito in ambito di modellistica ed elaborazione dati. Le competenze di CISMA comprendono anche la gestione e l'analisi di grandi moli di dati attraverso l'utilizzo di sistemi digitali di database, basati su software open-source. In questo contesto è consulente dell'ufficio Idrologia e Dighe della Provincia di Bolzano per la gestione delle stazioni di misura della portata liquida e del trasporto solido sui torrenti Gadera a Mantana e Solda a Ponte Stelvio. CISMA è attualmente consulente anche dell'Agenzia per la Protezione civile della Provincia di Bolzano per la gestione dei dati raccolti nel sito sperimentale Gadria in val Venosta.

MOUNTAIN-EERING è nata nel 2008 come primo spin-off dell'Università di Trento, con la mission di trasferire la conoscenza in ambito ingegneristico dei risultati della ricerca scientifica nell'ambito del dissesto idrogeologico con particolare riferimento a: modellazione idrologica dei deflussi di versante; modellazione e analisi idraulica del trasporto solido e della propagazione dei fenomeni di colate detritiche e alluvionali; modellazione e analisi dei fenomeni di innesco di frane superficiali in terreni saturi e non saturi. MOUNTAIN-EERING ha collaborato a lungo con l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) nell'ambito del monitoraggio di variabili idro-meteorologiche e della loro variabilità in ambiti orograficamente complessi, come quelli montani, quali forzanti (driver) del dissesto idrogeologico. Ha collaborato con l'USGS (United State Geological Survey) nell'ambito dello studio dell'innesco di frane superficiali in terreni saturi e insaturi e nel loro monitoraggio. Per la Provincia di Bolzano ha progettato l'innovativa stazione per il monitoraggio del trasporto solido al fondo lungo sul torrente Solda a Ponte Stelvio. Per l'Agenzia per la Protezione civile della Provincia di Bolzano, MOUNTAIN-EERING ha sviluppato un sistema di acquisizione e archiviazione di immagini e video di eventi di colata detritica all'interno del sito sperimentale Gadria in val Venosta.

Il progetto S-DEWAS si propone di capitalizzare le competenze tecnico-scientifiche delle due aziende al fine di sviluppare un sistema di allerta precoce dedicato alla previsione dell'innesco di colate detritiche, utilizzando un approccio integrato di dati osservati e di modelli numerici fisicamente basati. Il progetto ha quindi una doppia valenza. Da un lato propone un'azione sperimentale per la realizzazione di un sistema di allerta (Early Warning System) nell'ambito di fenomeni legati al dissesto idrogeologico. Dall'altro propone la messa a disposizione di risultati di pratico impiego conseguenti all'utilizzo di tecnologie digitali per l'elaborazione di dati meteorologici, idrologici e geologici. Inoltre, la gestione dei pericoli naturali, e nella fattispecie relativi alle colate detritiche (debris flow), con un approccio non infrastrutturale, offre il duplice

vantaggio di proteggere gli insediamenti esistenti e le realtà produttive, senza costruire nuove opere ed ottimizzando la gestione di quelle esistenti.

Il sito prescelto per l'implementazione di questo sistema è il bacino del Rio Gadria, collocato in val Venosta (BZ) tra i Comuni di Lasa e di Silandro. La scelta del sito è motivata dal fatto che esso è già dotato di un sistema di monitoraggio installato in parte dalla Provincia di Bolzano e in parte dalla BOKU di Vienna. Attualmente il bacino è oggetto di analisi da parte dell'Università di Bolzano, del CNR-IRPI di Padova e della BOKU stessa. Inoltre CISMA e MOUNTAIN-EERING da anni collaborano per la gestione e l'archiviazione della base dati in cui convergono le misure del sistema di monitoraggio costituito da: 3 pluviometri dislocati nel bacino, 3 sensori di livello lungo l'asta del torrente, 3 telecamere, alcuni geofoni e sensori per la misura della pressione di impatto del fronte della colata. Tutto ciò permette al progetto di beneficiare degli strumenti installati, delle serie storiche dei dati acquisiti, e del know how sviluppato.

Il sistema S-DEWAS è basato su 3 componenti principali:

1. Modulo meteorologico.
2. Modulo idromorfologico.
3. Interfaccia utente.

Il modulo meteorologico è dedicato alla previsione di breve termine e di nowcasting dei campi di precipitazione sul bacino del Rio Gadria, anche attraverso l'utilizzo in tempo reale dei dati misurati dal nuovo RADAR di Monte Macaion e dei dati pluviometrici disponibili nel bacino. La previsione delle precipitazioni vedrà l'utilizzo di modelli meteorologici fisicamente basati, al fine di aumentare l'affidabilità e l'accuratezza dell'input da fornire al modello idromorfologico.

Il modulo idromorfologico è dedicato alla modellazione fisicamente basata dei processi idrologici di versante che regolano il flusso di acqua e di detriti innescati dai campi di precipitazioni restituiti dal modulo meteorologico. Il modello consentirà di individuare la probabilità di innesco delle colate detritiche ed il corrispondente valore soglia, a fronte di diversi eventi meteorici ed in funzione di altri fattori, tra cui la topografia e la disponibilità di detriti sui pendii del bacino.

Lato utente, le elaborazioni condotte dal sistema S-DEWAS verranno rese disponibili mediante una dashboard (web-app) che consenta un utilizzo operativo ed efficace di supporto delle attività di monitoraggio e di allerta del servizio. All'interno della dashboard convergeranno i dati misurati ed elaborati dai modelli unitamente a statistiche e altre grandezze definite interagendo con potenziali utilizzatori del sistema.

Il deliverable **D1.2 – Algoritmi di assimilazione delle precipitazioni** è redatto con lo scopo di fornire un manuale operativo recante la descrizione degli algoritmi sviluppati e implementati per garantire l'assimilazione di dati pluviometrici all'interno della catena modellistica meteorologica del tool S-DEWAS al fine di poter effettuare il nowcasting delle precipitazioni. All'interno della domanda di progetto era stata prevista la realizzazione di un sistema di acquisizione dei dati pluviometrici, affinché essi potessero essere assimilati all'interno delle previsioni meteorologiche. Durante lo sviluppo del progetto, a seguito di confronto con l'ente gestore (Protezione civile), si è appreso che i pluviometri installati all'interno nel bacino del Gadria, hanno avuto dei temporanei malfunzionamenti con conseguente parziale mancanza di dati. Pertanto, parallelamente, si è proceduto allo sviluppo del sistema di acquisizione e pre-elaborazione dei dati RADAR messi a disposizione in tempo reale per il progetto dal Servizio Meteorologico della Provincia Autonoma di Bolzano. Infine, si è valutata l'opzione di utilizzare la libreria open-source pySTEPS per effettuare il nowcasting delle precipitazioni. L'utilizzo di quest'ultima soluzione permette infatti di aumentare la versatilità di utilizzo del sistema S-DEWAS, evitando l'installazione di un sistema previsionale ad-hoc con i conseguenti problemi connessi alla gestione e manutenzione della catena di approvvigionamento del dato.

All'interno del presente deliverable si descrivono i sistemi di acquisizione dati sviluppati ed il sistema di nowcasting delle precipitazioni implementato.

## 2. SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI DA PLUVIOMETRI

All'interno della domanda di progetto è stato previsto lo sviluppo di un sistema di acquisizione e pre-elaborazione dei dati di precipitazione misurati in tempo reale dai pluviometri presenti all'interno del bacino del Rio Gatria. I dati misurati al suolo permettono infatti di:

- calibrare e validare le previsioni di precipitazione (sia di breve termine, sia di nowcasting) ed i dati RADAR;
- assimilare l'ultimo dato disponibile all'interno della catena modellistica del modulo meteorologico per la generazione delle previsioni.

L'assimilazione dei dati misurati al suolo in un modello meteorologico richiede però uno step intermedio, che si configura con la spazializzazione del dato. Infatti, le misure al suolo restituiscono informazioni puntuali e localizzate in punti specifici del bacino. L'input richiesto da un modello meteorologico deve invece essere spazializzato e fornito su di una griglia regolare.

La spazializzazione dei dati di precipitazione misurati al suolo per la generazione di dataset su griglia regolare è un argomento consolidato nella letteratura tecnico-scientifica. Tra le diverse tecniche a disposizione per effettuare queste elaborazioni, il metodo più diffuso consiste nell'implementazione di algoritmi di kriging ordinario con gradiente sulla quota (quindi un approccio 3D) e l'utilizzo di una funzione di semivariogramma per descrivere la correlazione spaziale tra i valori della variabile.

Tuttavia, a seguito di un confronto con l'ente gestore (Protezione civile), si è appreso che i pluviometri installati all'interno nel bacino del Gatria, utili per caratterizzare la distribuzione spaziale della precipitazione a livello locale, hanno avuto dei temporanei malfunzionamenti con conseguente parziale mancanza di dati.

All'interno del tool S-DEWAS è comunque proceduto a predisporre un modulo per l'acquisizione dei dati dai pluviometri, che potrà essere attivato una volta che tali strumenti torneranno operativi.

### 3. SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI DA RADAR

Il tool S-DEWAS prevede l'utilizzo dei dati di precipitazione misurati dal nuovo RADAR di Monte Macaion per il nowcasting delle precipitazioni, ossia per la generazione di previsioni meteorologiche a poche ore dell'evento e durante l'evoluzione del medesimo. Si è così proceduto alla definizione delle modalità con cui i dati RADAR possano essere assimilati all'interno del modulo meteorologico per la generazione dei campi di precipitazione (soprattutto in modalità di nowcasting), attraverso: lo sviluppo del sistema di acquisizione dei dati RADAR comprensivo di pre-elaborazione e archiviazione e la predisposizione dei dati RADAR come input agli algoritmi di data-assimilation nel modello meteorologico WRF da utilizzare in modalità nowcasting.

I dati del nuovo RADAR di Monte Macaion messi sono stati messi a disposizione dal Servizio Idrografico della Provincia di Bolzano. La scelta di questo data-provider comporta alcuni vantaggi, tra cui una maggiore facilità di interazione con i gestori del RADAR per eventuali chiarimenti circa l'interpretazione del dato. Inoltre, essendo S-DEWAS un servizio di allerta precoce, è necessario contenere il numero di iterazioni e passaggi che il dato misurato deve percorrere prima di essere reso disponibile sull'open-data. In questo caso, il Servizio Idrografico della Provincia di Bolzano è di fatto il fornitore dei dati RADAR al Dipartimento di Protezione Civile Nazionale e quindi l'utilizzo del dato è più immediato.

#### 3.1 SISTEMA DI ACQUISIZIONE, PRE-ELABORAZIONE E ARCHIVIAZIONE

Individuato il data-provider più idoneo agli scopi del progetto, si è proceduto allo sviluppo di un modulo automatizzato dedicato ad acquisire, pre-elaborare ed archiviare i dati RADAR. Le attività del modulo possono essere riassunte nei seguenti step:

1. Accesso all'open-data del data-provider per verificare la disponibilità di nuove scansioni e download. Questa operazione è eseguita ogni 5 minuti da uno script bash. Nuove scansioni sono quindi scaricate in locale.
2. Pre-elaborazione dei dati scaricati. I dati del RADAR di Monte Macaion sono resi disponibili come immagini Geotiff, ma senza sistema di riferimento assegnato. Prima di un loro utilizzo diretto all'interno di S-DEWAS è quindi necessario procedere ad una loro pre-elaborazione.
3. Archiviazione del file affinché la scansione possa essere utilizzata dalle successive elaborazioni (assimilazione nel modello meteorologico WRF e utilizzo da parte del tool pySTEPS).

La pre-elaborazione è condotta da una serie di script sviluppati ad-hoc che:

1. Verificano la presenza di un nuovo download ed archiviano il dato "grezzo" (backup della scansione "grezza");
2. Operano sul Geotiff acquisito al fine di assegnare il sistema di riferimento (EPSG:32632) in cui il dato è misurato, ma che non è assegnato all'interno del file (georeferenziazione del dato);
3. Assegnano il valore di NO-DATA a tutti i pixel dell'immagine che si trovano al di fuori del cono visivo del RADAR (la scansione del radar è circolare, ma per definizione l'area all'interno del Geotiff è il quadrato circoscritto all'area scansionata);
4. Salvataggio dell'immagine in formato Geotiff compresso al fine di ottimizzare la gestione della memoria dedicata allo storage.

L'intero processo di pre-elaborazione è stato automatizzato per essere eseguito non appena una nuova scansione è acquisita in locale. Il sistema implementato è attualmente funzionante e consente di acquisire i dati RADAR sull'area di interesse.

## 4. NOWCASTING DELLE PRECIPITAZIONI

### 4.1 IDENTIFICAZIONE DI SOFTWARE OPEN-SOURCE PER IL NOWCASTING

Parallelamente alle attività sopra descritte, si è proceduto ad individuare e successivamente valutare l'applicabilità di alcuni modelli di nowcasting, appositamente sviluppati per l'elaborazione dei dati RADAR in tempo reale, per applicazioni simili agli scopi di S-DEWAS. Questi modelli si propongono infatti essere più efficaci dei modelli meteorologici tradizionali per il nowcasting in quanto:

- sono caratterizzati da un onere ed un tempo computazionale inferiore;
- possono gestire facilmente il flusso di dati, non appena essi sono resi disponibili;
- non richiedono un'installazione e un set-up ad-hoc se applicati in un'altra area.

Tutto ciò permette di aggiornare più rapidamente la previsione dei campi di precipitazione, aumentando di conseguenza la capacità predittiva del servizio. Inoltre, in un'ottica futura di sviluppo e commercializzazione del servizio S-DEWAS, l'utilizzo di software open-source, facilmente implementabile e configurabile in corrispondenza dell'area di interesse eviterebbe la necessità di effettuare il setup ad-hoc di un modello meteorologico completo come WRF, con una conseguente riduzione dei tempi tecnici ed un aumento della versatilità ed espandibilità del servizio in altre aree.

Nell'ambito della modellistica di nowcasting delle precipitazioni, sono stati individuati alcuni applicativi open-source utili ai fini del progetto. Sulla base delle caratteristiche dei vari modelli e della letteratura scientifica disponibile, si è deciso di utilizzare all'interno del progetto S-DEWAS il prodotto denominato [pySTEPS](#)<sup>1</sup>.

pySTEPS è il risultato dell'omonima iniziativa a cui hanno preso parte il Finnish Meteorological Institute, MeteoSwiss, la Colorado State University, l'ETHzürich e il Bureau of Meteorology australiano. pySTEPS si configura come un'applicazione in linguaggio Python, sviluppata per generare previsioni di nowcasting deterministiche e probabilistiche attraverso un approccio data-driven e fisicamente basato del flusso in tempo reale di dati RADAR.

pySTEPS implementa diverse tipologie di algoritmi e procedure che consentono all'utilizzatore finale di realizzare un modello di nowcasting ritagliato sulle proprie esigenze. In particolare, a supporto della personalizzazione dello strumento, il software implementa anche algoritmi che consentono la verifica della qualità e della rappresentatività degli scenari simulati. Infine, pySTEPS è già stato testato in diversi contesti, tra cui il monitoraggio in tempo reale di eventi di colata detritica.

### 4.2 VERIFICA DELL'UTILIZZO DEL TOOL PYSTEPS IN S-DEWAS

In linea generale, l'estrapolazione dell'informazione contenuta nei dati RADAR attraverso un approccio data-driven fisicamente basato per la generazione di nowcasting richiede:

- algoritmi per la stima del campo di moto;
- implementazione di metodi per l'avvezione degli echo del RADAR sulla base del campo di moto precedentemente stimato.

Il tool pySTEPS consente di implementare diverse tecniche per il nowcasting sia deterministico che probabilistico delle precipitazioni, sulla base del principio della "persistenza Lagrangiana" (Lagrangian persistence) delle misure RADAR. La persistenza Lagrangiana ipotizza che all'interno del periodo di qualche ora l'evoluzione della precipitazione possa essere catturata dal movimento delle echo del RADAR mediante un campo di moto stazionario senza variazioni significative dell'intensità. L'ipotesi di stazionarietà alla base del metodo è la principale fonte di errori di questo approccio, in quanto non permette di modellare fenomeni intrinsecamente non stazionari quali: l'inizio, la crescita, il decadimento e la conclusione delle

<sup>1</sup> <https://pysteps.github.io/>

precipitazioni, oltre a non considerare le variazioni del campo di moto. Per far fronte a queste problematiche nella letteratura tecnico-scientifica sono stati proposti numerosi metodi, alcuni dei quali sono implementati in pySTEPS. Inoltre, vi è da tenere in considerazione che gli scenari di nowcasting sono caratterizzati da un'elevata frequenza di aggiornamento (fino a 5 minuti), che consente al sistema di modificare rapidamente gli scenari simulati sulla base della naturale variabilità delle precipitazioni.

In relazione alle caratteristiche di qualità del dato RADAR disponibile ed in funzione delle necessità di utilizzo, spetta quindi all'utente finale la scelta del set di algoritmi che consentono di restituire scenari di nowcasting rappresentativi e realistici. Nell'ambito dello sviluppo di un sistema di allerta precoce come S-DEWAS la scelta degli algoritmi per la generazione del nowcasting è per via di cose un trade-off tra garantire l'accuratezza nella previsione degli eventi intensi e contingentare l'onere computazionale al fine di contenere e ridurre i tempi di calcolo, garantendo così un aggiornamento rapido del sistema sulla base del flusso dati disponibile.

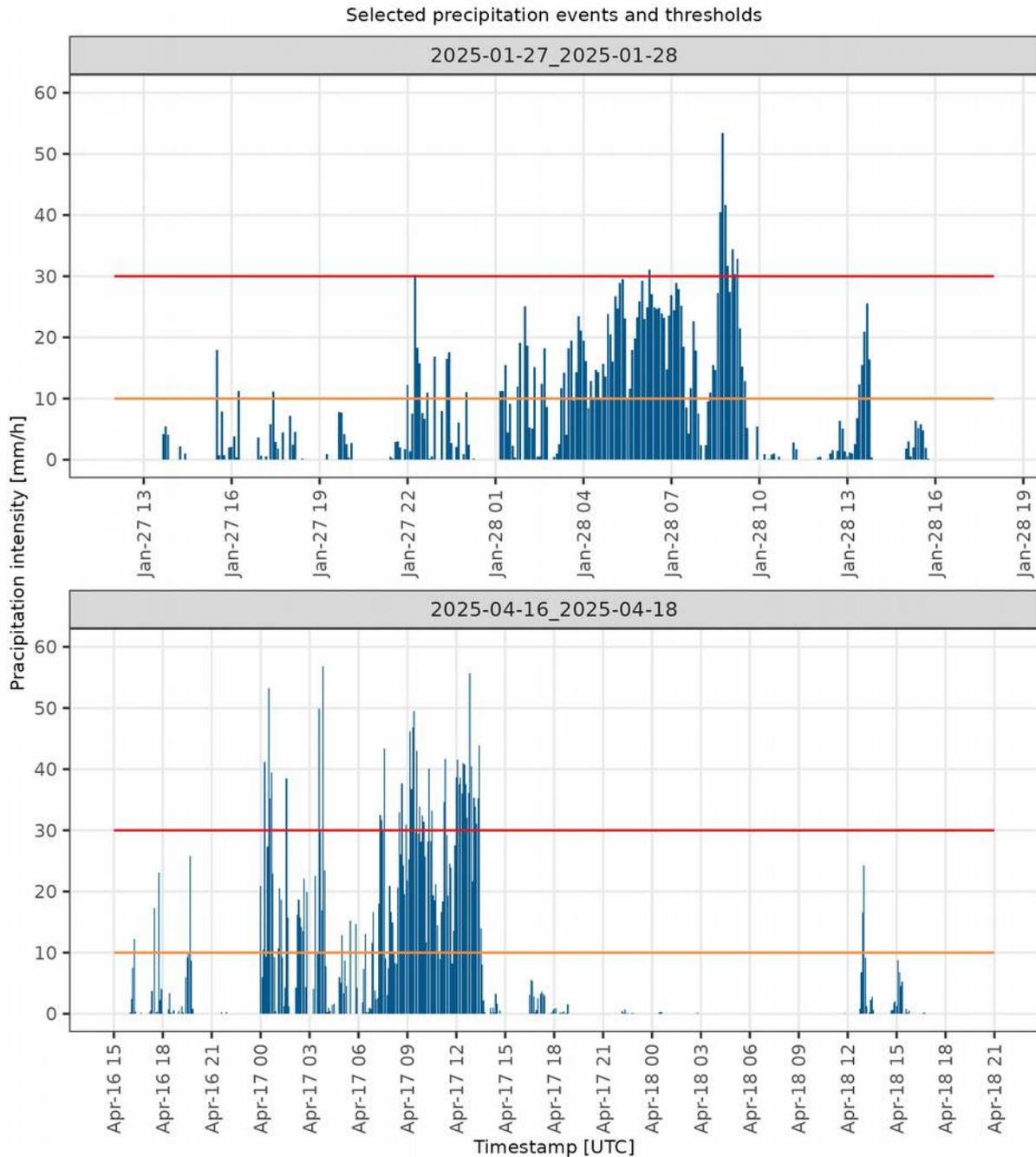
Al fine di poter utilizzare operativamente pySTEPS all'interno di S-DEWAS si è proceduto eseguendo le seguenti attività:

1. Lo storico dei dati del nuovo RADAR, disponibile da novembre 2024 ad oggi, è stato acquisito. Inoltre esso è costantemente aggiornato con i dati acquisiti automaticamente durante il progetto, grazie al sistema di acquisizione dati sviluppato. Ciò consente di disporre un data set con eventi di precipitazione significativi per testare diversi approcci di nowcast con pySTEPS.
2. Gli eventi meteorologici più significativi, intercorsi da novembre 2024 ad aprile 2025 (Fig. 1), sono stati individuati per essere utilizzati come caso studio nel definire il setup di pySTEPS. Per questo fine particolare, la mancanza dei dati pluviometrici al suolo all'interno del bacino del Gadria è stata sostituita confrontando i dati di precipitazione misurati sul fondovalle della Val Venosta dalle stazioni gestite dal Servizio idrografico provinciale di Lasa-Oris (ID: 08200MS) e di Silandro (ID: 09700MS), che si collocano rispettivamente ad Ovest e ad Est dello sbocco della bacino del Rio Gadria in Val Venosta.
3. Per poter valutare i diversi algoritmi che compongono la libreria pySTEPS è stato sviluppato un framework di testing in linguaggio python e visualizzazione dei risultati in una dashboard R-Shiny che ha visto come primo passo la modifica del codice di pySTEPS al fine di interfacciare correttamente il formato dei dati del RADAR di Monte Macaion con i requisiti del tool. Successivamente, si è proceduto alla produzione di script che consentono di implementare diverse tecniche di nowcasting sulla base dell'informazione disponibile, congiuntamente con la generazione delle tabelle di contingenza della precipitazione e relativi indicatori statistici sintetici.
4. La validazione del metodo di calcolo, finalizzata a definire la procedura di calcolo più idonea sulla base delle esigenze del progetto, è stata condotta confrontando l'intensità di precipitazione attesa all'interno del bacino del Gadria generata in sede di nowcasting con quella effettivamente osservata dal RADAR in corrispondenza del medesimo timestep mediante le tabelle di contingenza e l'hit rate precedentemente calcolati.
5. La generazione degli scenari di nowcasting è stata condotta testando la combinazione di diversi algoritmi sia per la stima del campo di moto (optical flow methods) sia per l'avvezione delle echo del RADAR.

Relativamente agli algoritmi per il campo di moto sono stati investigati i seguenti metodi:

1. Lucas-Kanade (LK): il metodo individua e traccia celle di precipitazione utilizzando una sequenza di almeno 2 scansioni RADAR.
2. Variational echo tracking (VET): il metodo si basa sull'utilizzo di una routine di ottimizzazione globale che cerca di minimizzare una funzione di costo tra un'immagine RADAR di riferimento e un'immagine successiva in cui si ha lo spostamento della perturbazione.

3. Dynamic and adaptive radar tracking of storms (DARTS): il campo di moto è stimato calcolando la trasformata discreta di Fourier (DFT) su di una sequenza temporale di scansioni RADAR. La risoluzione spaziale del campo di moto è quindi connessa al numero di coefficienti di Fourier utilizzati per ricostruire il campo. Vista la natura spettrale dell'approccio, l'algoritmo necessita di una lunga serie di scansioni che possono aumentare il costo computazionale dell'elaborazione.
4. Anisotropic diffusion method (ADM): il metodo accoppia equazioni di diffusione non lineari, integrando l'approccio classico, basato sull'utilizzo di equazioni differenziali, con il grado di correlazione dei campi di precipitazione. L'approccio permette di ricostruire il campo di moto preservando le discontinuità.



*Figura 1: Eventi di precipitazione selezionati per la validazione del nowcasting. Le linee orizzontali in arancio e in rosso indicano i valori soglia utilizzati per valutare la dipendenza delle statistiche dall'intensità di precipitazione.*

Gli scenari di nowcasting sono invece stati calcolati utilizzando i seguenti metodi implementati in pySTEPS e caratterizzati da una complessità (e un onere computazionale) via via crescente:

1. extrapolation: il metodo utilizza l'ultima scansione RADAR disponibile estrapolando la posizione della precipitazione sulla base del campo di moto stimato, non consentendo quindi di prevedere la crescita e l'esaurimento delle precipitazioni.

2. ANVIL: è utilizzato per generare nowcast deterministici che consentono di prevedere la crescita e il decadimento delle precipitazioni, preservando le piccole scale e non richiede particolari metodi di post-processing richiesti invece da altri metodi di nowcasting deterministico come ad esempio S-PROG.
3. STEPS: estende S-PROG permettendo la generazione di nowcast probabilistici. In particolare il metodo implementa un approccio stocastico che consente di rappresentare la varianza associata allo sviluppo (non prevedibile) di una precipitazione, allentando le restrizioni introdotte dalla persistenza Lagrangiana.
4. Lagrangian Integro-Difference equation model with Autoregression (LINDA): permette la generazione di nowcasting deterministici e probabilistici, implementando tecniche computazionalmente efficienti e fisicamente robuste per tener conto dei processi non stazionari che caratterizzano i campi di precipitazione.

Le diverse combinazioni di metodi per la generazione del nowcasting comportano diversi oneri computazionali oltre ad essere caratterizzate da diversi gradi di accuratezza nella previsione dei campi di precipitazione.

Al termine di questa fase, sono stati presi in considerazione per la generazione dei nowcasting:

- il metodo basato sull'extrapolazione;
- il metodo ANVIL.

Entrambi questi approcci sono stati eseguiti con i criteri per il calcolo del flusso ottico sopra elencati. I restanti approcci, invece, sono stati esclusi in quanto computazionalmente più onerosi per gli scopi del progetto.

### 4.3 VERIFICA E VALIDAZIONE DEGLI ALGORITMI DI NOWCASTING

Il RADAR di Monte Macaion restituisce ogni 5 minuti l'altezza di precipitazione dei 5 minuti tra una scansione e la successiva. Tale dato è successivamente convertito in intensità oraria di precipitazione (mm/h). Gli ietogrammi riportati in Figura 1 rappresentano l'intensità oraria di precipitazione totale, ottenuta sommando le misure del RADAR in tutte le celle che ricadono o intercettano il bacino del Gadria. Oltre agli ietogrammi, in Figura 1 si riportano anche due valori soglia individuati in corrispondenza delle intensità di 10 mm/h e 30 mm/h, che equivalgono ad assumere sull'intero bacino un'intensità di precipitazione media, uniformemente distribuita, pari rispettivamente a 0.3 e 0.8 mm/h. L'utilizzo di queste soglie permette di valutare se il modello di nowcasting è in grado di prevedere correttamente le precipitazioni all'aumentare della loro intensità.

La verifica dei diversi approcci per la generazione delle previsioni di nowcasting è stata condotta sull'intensità complessiva di precipitazione all'interno del bacino, valutando la capacità del modello nel:

1. prevedere la presenza/assenza di precipitazione;
2. prevedere correttamente l'intensità della precipitazione;
3. prevedere correttamente l'intensità della precipitazione in funzione dell'intensità dell'evento.

Le tabelle di contingenza rappresentano il punto di partenza per tale verifica. Questo strumento consente infatti il confronto tra il dato osservato e quello simulato, al fine di identificare se il modello prevede o non prevede un evento meteorologico quando questo si è veramente osservato oppure no.

In Tabella 1 si riporta la struttura della tabella di contingenza utilizzata per le analisi e per il calcolo degli indici di successo nel seguito descritti.

Tabella 1 - Esempio di tabella di contingenza

	Osservato	Non osservato	
Previsto	Hits (H)	False Alarm (F)	H+F
Non previsto	Misses (M)	Correct negatives (C)	M+C
	H+M	F+C	

In Figura 2 si riportano, in forma di istogramma, le tabelle di contingenza ottenute per i diversi metodi di nowcasting investigati. La figura è organizzata in 2 colonne, ciascuna per un metodo di nowcasting (estrapolazione e ANVIL) e in 4 righe, ciascuna per un metodo di calcolo del flusso ottico (LK, VET, DARTS, ADM).

All'interno di ciascun grafico si riporta invece la distribuzione in frequenza delle casistiche che compongono la tabella di contingenza, considerando:

- tutti i dati disponibili (threshold  $\geq 0$ );
- le precipitazioni con un'intensità osservata maggiore di 10 mm/h;
- le precipitazioni con un'intensità osservata maggiore di 30 mm/h.

Da una prima analisi emerge che:

- i metodi di nowcasting basati sull'estrapolazione tendono a prevedere meno precipitazioni rispetto ai metodi basati sulla tecnica ANVIL (Hits), anche filtrando gli eventi in funzione dei valori soglia, ossia andando a considerare solo gli eventi più intensi;
- i metodi di nowcasting basati sulla tecnica ANVIL tendono invece a generare più falsi allarmi, rispetto ai metodi basati sull'estrapolazione;
- tra i metodi testati, l'approccio ANVIL-DARTS è quello che restituisce il minor numero di eventi osservati ma non simulati.

Sulla base delle precedenti osservazioni appare quindi che il metodo ANVIL-DARTS sia quello che globalmente restituisce previsioni di nowcasting più realistiche.

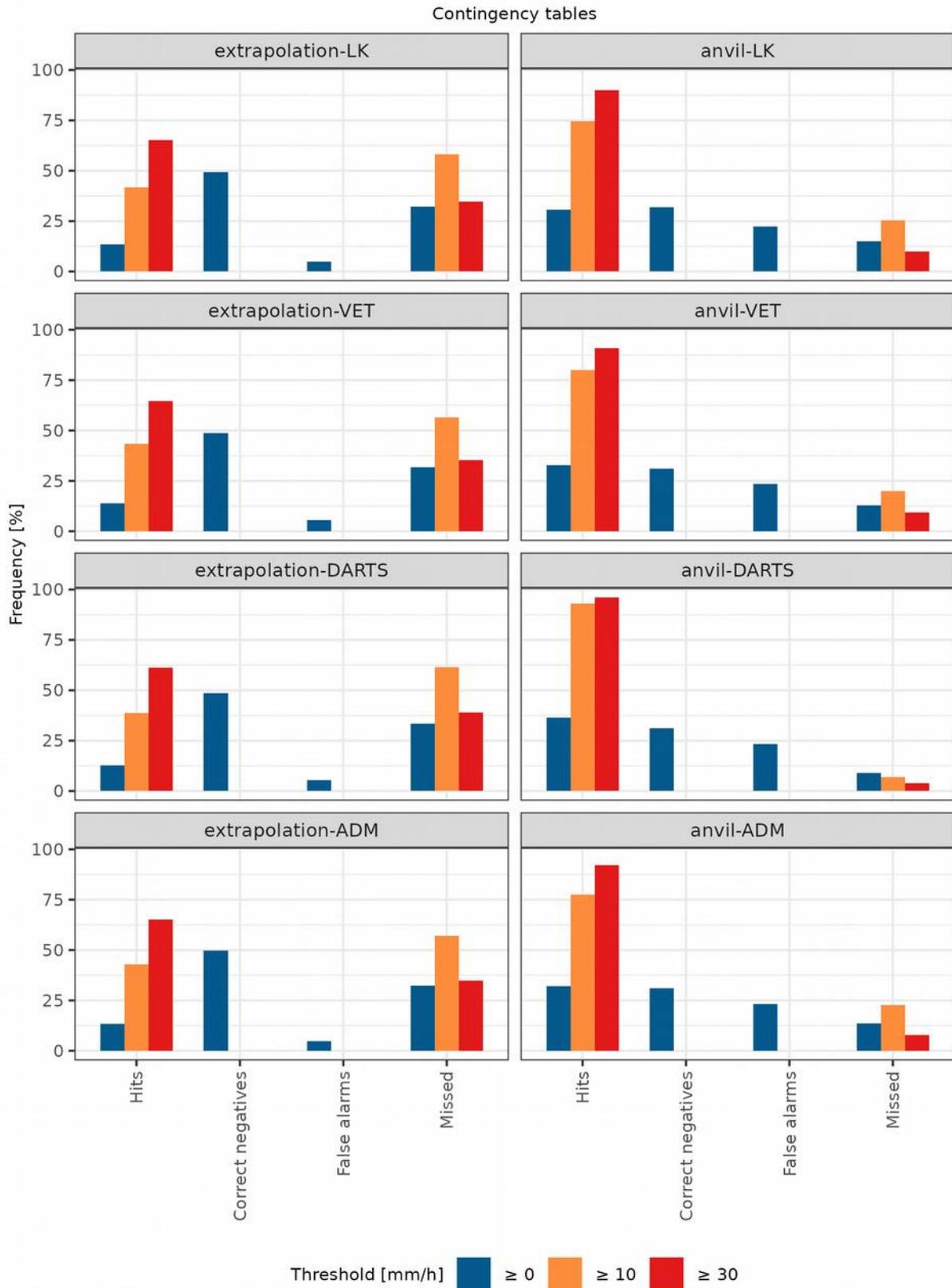


Figura 2: Tabelle di contingenza ottenute per ciascun metodo di nowcasting implementato ed in funzione di un valore soglia sull'intensità di precipitazione.

Sulla base dei valori ottenuti dalle tabelle di contingenza, si è proceduto a calcolare i seguenti indici critici di successo, che consentono di valutare con maggiore dettaglio la performance dei diversi approcci adottati per il nowcasting:

- Critical Success Index:  $CSI = H / (H+M+F)$ . Il CSI assume un valore compreso tra 0 e 1 e restituisce la percentuale di eventi effettivamente intercorsi e correttamente simulati rispetto ai falsi allarmi e agli eventi non previsti. Il metodo di nowcasting migliore è quello con CSI più elevato.
- Probability of Detection:  $POD = H / (H+M)$ . Il POD assume un valore compreso tra 0 e 1 e restituisce la percentuale di eventi effettivamente intercorsi e correttamente simulati rispetto la totalità degli eventi osservati (previsti e non previsti). Il metodo di nowcasting migliore è quello con POD più elevato.
- False Alarm Ratio:  $FAR = F / (H+F)$ . Il FAR assume un valore compreso tra 0 e 1 e restituisce la percentuale falsi allarmi (eventi previsti ma non osservati) rispetto la totalità degli eventi previsti (osservati e non non osservati). Il metodo di nowcasting migliore è quello con FAR più contenuto.
- Frequency Bias:  $BIAS = (H+F) / (H+M)$ . Il BIAS assume un valore positivo, non limitato superiormente, restituisce la percentuale tra la totalità di eventi previsti (osservati e non osservati) rispetto la totalità degli eventi osservati (previsti e non previsti). Il metodo di nowcasting migliore è quello con BIAS più prossimo all'unità.

Il calcolo degli indici di successo è stato condotto per ciascun timestep ed in funzione del lead-time della previsione. In questo modo è possibile valutare la performance del modello in funzione delle finestra di simulazione e quindi valutare la alla predicibilità degli eventi meteorologici. Inoltre, gli indici sono stati calcolati considerando sia l'intero data set simulato sia il data set filtrato in funzione dell'intensità dell'evento, sulla base dei valori soglia individuati in precedenza.

I grafici riportati da Figura 3 a Figura 6 mostrano gli andamenti ottenuti. Si osserva così che:

1. Indipendentemente dal criterio per il calcolo dell'optical flow, i metodi di nowcasting basati sull'algoritmo ANVIL, tendono a restituire risultati migliori, soprattutto nella prima ora di simulazione, rispetto al nowcasting basato sull'estrapolazione. Infatti si osserva una netta separazione tra la famiglia di curve associate al metodo ANVIL con quelle ottenute mediante estrapolazione.
2. All'aumentare dell'intensità dell'evento gli indici investigati tendono a restituire valori migliorativi delle previsioni, anche al crescere del lead-time.
3. Anche in questo caso, l'approccio ANVIL+DARTS consente di produrre previsioni più realistiche anche per lead-time maggiori di 1 ora. Si osserva infatti che già con intensità superiori a 10 mm/h il BIAS ottenuto è pressoché prossimo all'unità, ad indicare una buona corrispondenza del modello nel cogliere gli eventi di precipitazione.

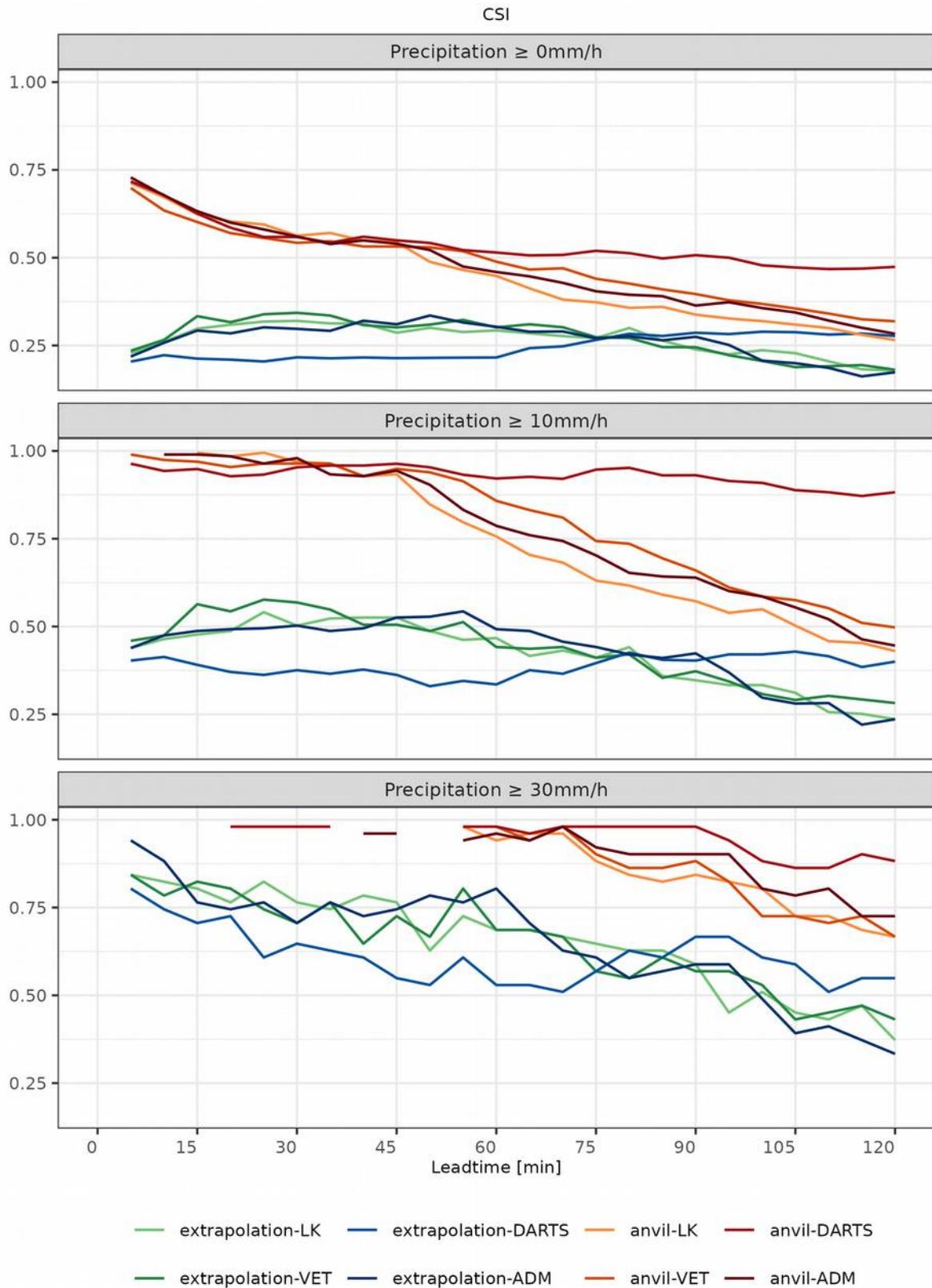


Figura 3: Indice CSI valutato per i diversi approcci di nowcasting in funzione del lead-time e dell'intensità dell'evento.

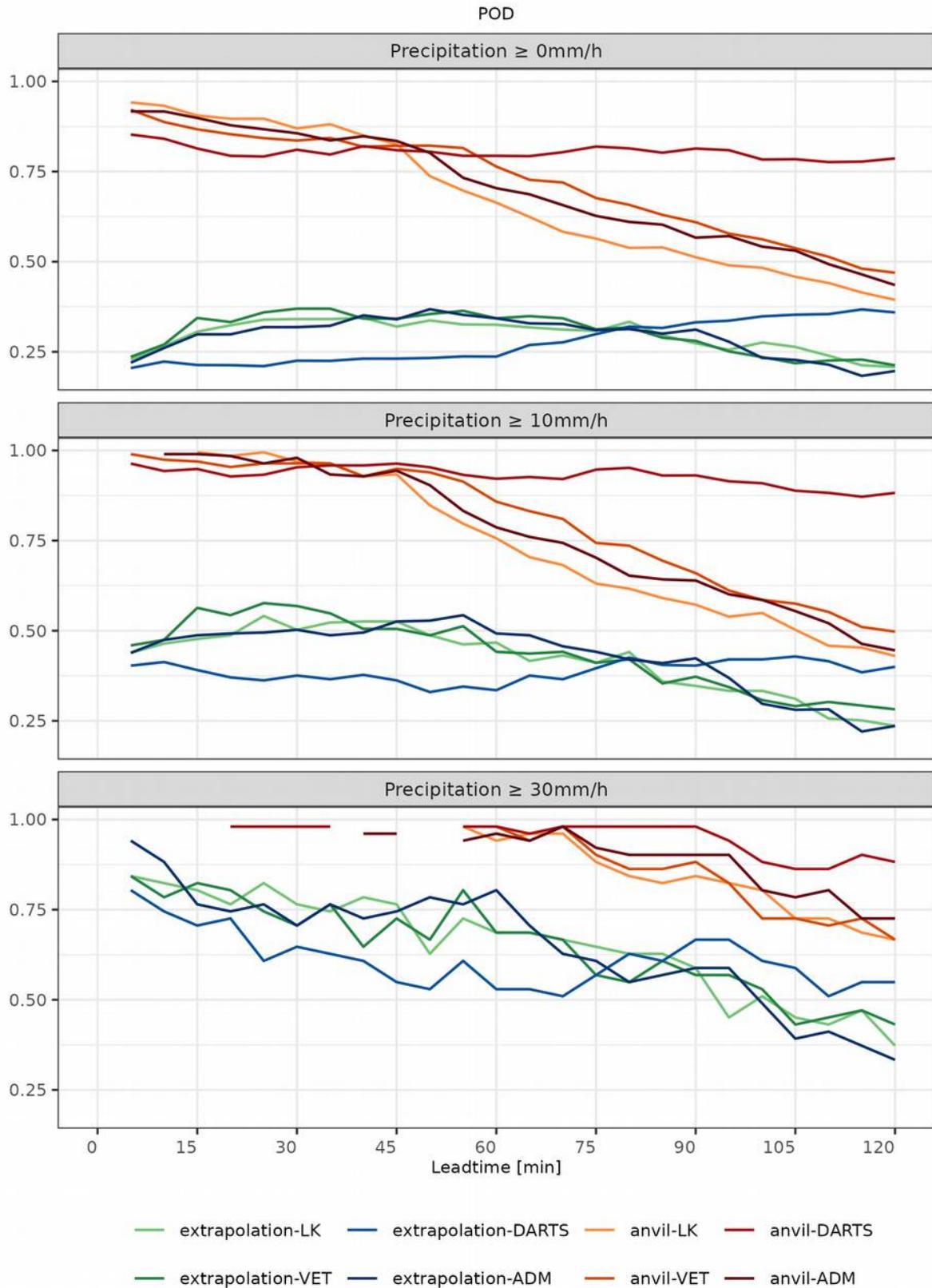


Figura 4: Indice POD valutato per i diversi approcci di nowcasting in funzione del lead-time e dell'intensità dell'evento.

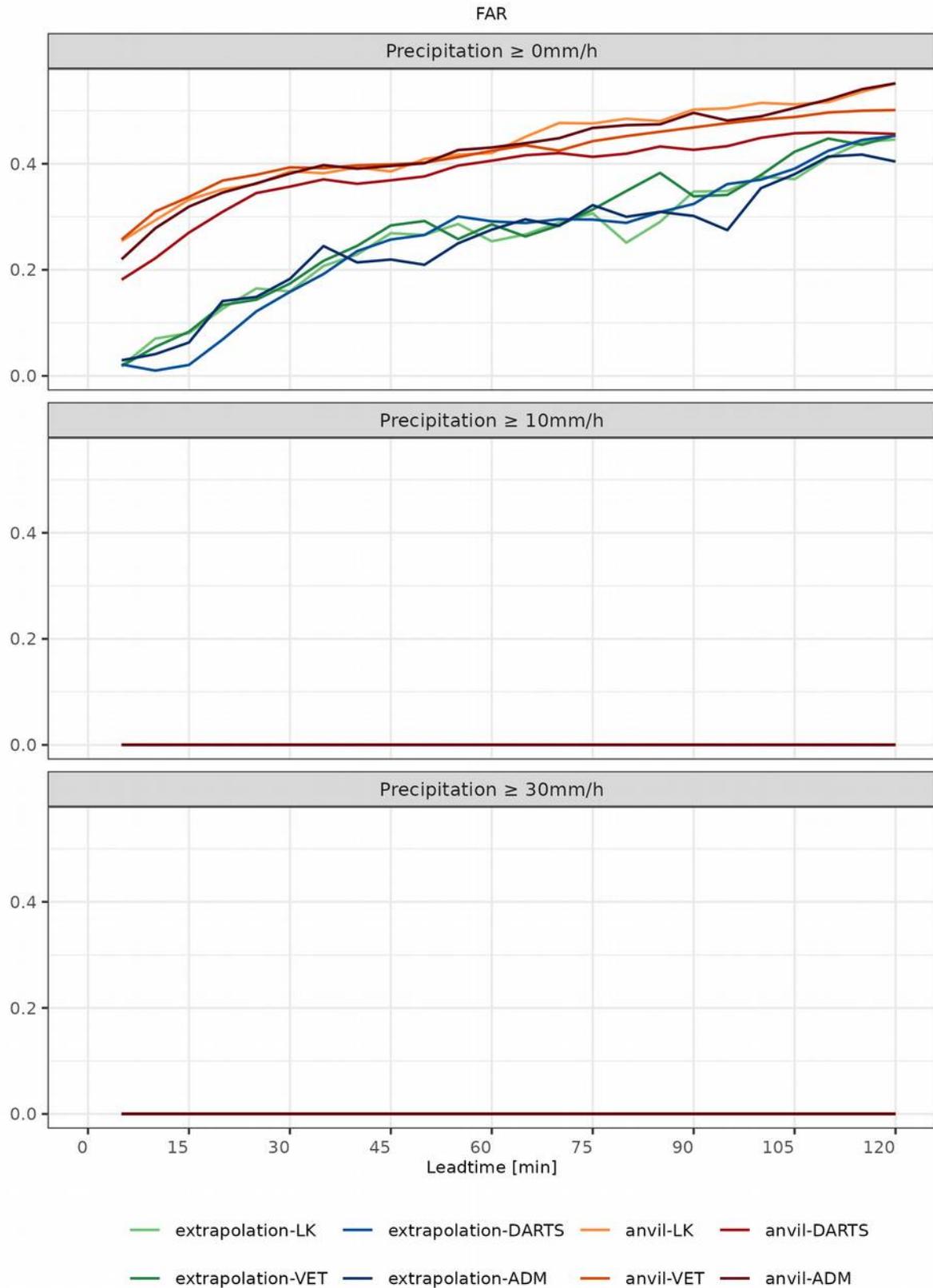


Figura 5: Indice FAR valutato per i diversi approcci di nowcasting in funzione del lead-time e dell'intensità dell'evento.

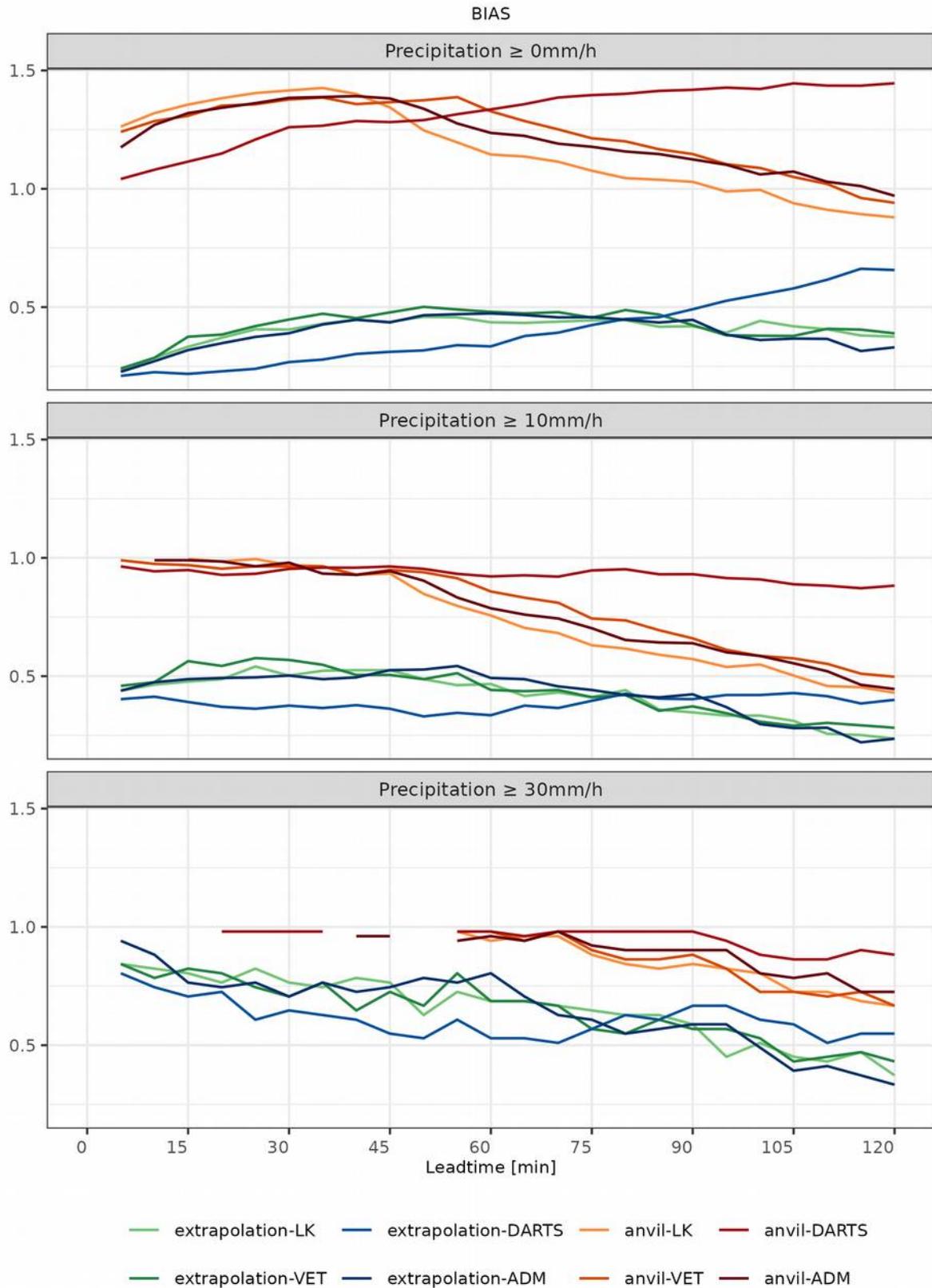


Figura 6: Indice BIAS valutato per i diversi approcci di nowcasting in funzione del lead-time e dell'intensità dell'evento.

Come ultima analisi ci si è concentrati sul valore assoluto dell'intensità di precipitazione simulata dai metodi di nowcasting rispetto ai valori effettivamente osservati, in corrispondenza del medesimo timestep.

A tal fine sono state prese in considerazione solo le coppie modellato-osservato corrispondenti alla porzione delle matrici di contingenza denominate Hits (H), ossia laddove il modello ha correttamente previsto una precipitazione osservata anche dal RADAR. In corrispondenza di queste coppie, fissato il metodo di nowcasting, il lead-time e la soglia che definisce l'intensità della precipitazione, si è proceduto a calcolare:

- l'errore medio assoluto (MAE), ossia il valor medio della differenza tra l'intensità di precipitazione simulata (mod) rispetto quella osservata (obs);
- l'errore standard (SE), che vista la diversa numerosità del campioni di dati risulta essere uno stimatore più informativo dell'errore assoluto attorno alla media alla deviazione standard.

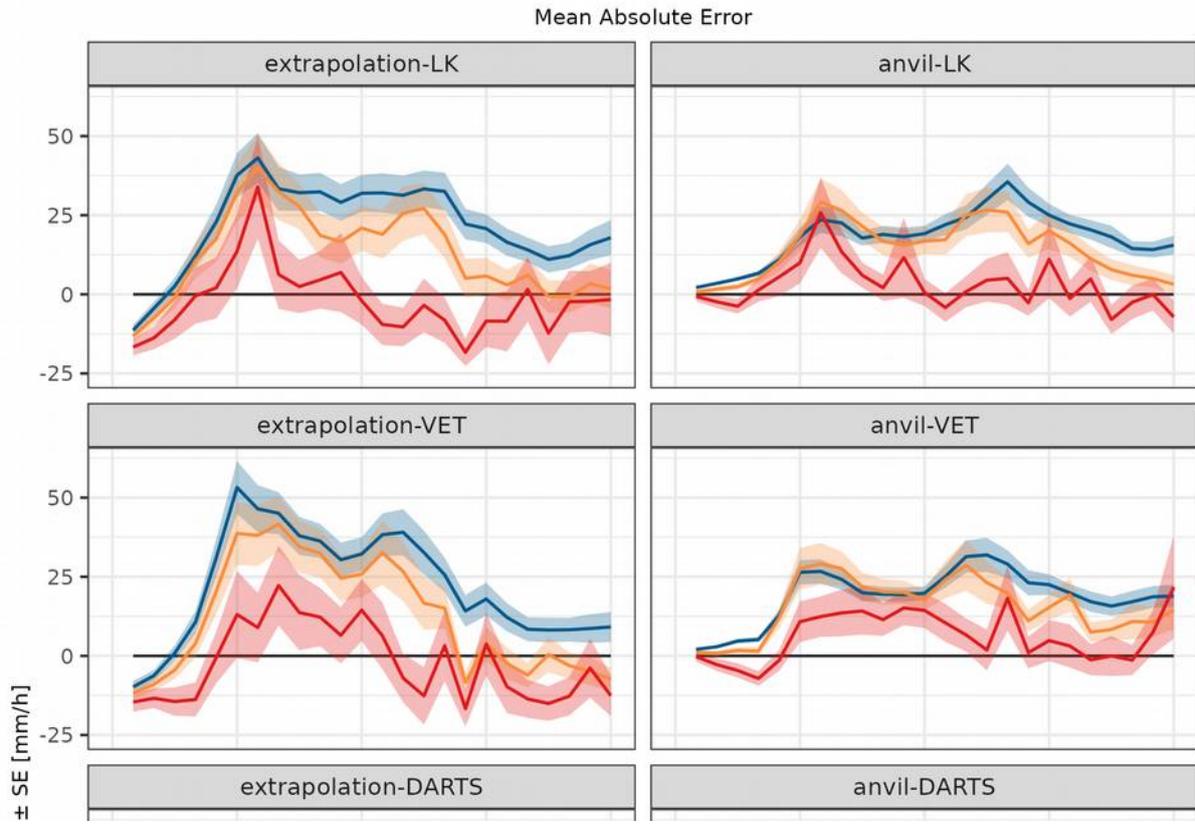
Un metodo di nowcasting è quindi preferibile ad un altro se i valori di MAE tendono ad assumere valori prossimi allo zero e l'errore standard è contenuto.

Le curve riportate in Figura 7 mostrano i trend ottenuti e confermano il metodo di nowcasting ANVIL+DARTS come la procedura più verosimile per la simulazione dei campi di precipitazione all'interno del progetto. In particolare si osserva come questa combinazione di procedure restituisca dei valori di MAE pressoché nulli in corrispondenza della soglia di 10 mm/h fino a oltre 60 minuti di lead-time.

All'aumentare delle soglia di intensità della precipitazione si osserva una sottostima della previsione di nowcasting rispetto al dato osservato, ma anche un aumento dell'errore standard. Quest'ultimo aspetto può essere connesso alla minor rappresentatività statistica del campione, in quanto gli eventi considerati con intensità di precipitazione superiore a 30 mm/h sono inferiori rispetto quelli con intensità superiore a 10 mm/h.

#### 4.4 IMPLEMENTAZIONE OPERATIVA DI PYSTEPS IN S-DEWAS

Tutti gli algoritmi per la generazione di scenari di nowcasting presi in considerazione sono stati implementati all'interno del modulo meteorologico del tool S-DEWAS come sotto moduli a sé stanti. L'idea è di utilizzare i restanti mesi del progetto per condurre una validazione completa del sistema di nowcasting, valutando quindi gli algoritmi con le migliori performance nella previsione delle precipitazioni per gli eventi che intercorreranno.



## 5. INPUT PLUVIOMETRICO AL MODELLO IDROMORFOLOGICO

Infine il sistema procede alla generazione dell'input pluviometrico necessario al modello idromorfologico. Le previsioni di precipitazione precedentemente elaborate sono salvate all'interno di un file NetCDF che ha una copertura spaziale pari all'area del bacino del Gatria. In particolare, all'interno del NetCDF le celle che ricadono o intercettano il contorno del bacino assumono valori positivi o nulli (in assenza di precipitazione), mentre alle rimanenti celle è assegnato un non valore.

Questa operazione è condotta utilizzando un'opportuna maschera che consente di evitare il calcolo in corrispondenza di celle che non appartengono al bacino di interesse.

Infine, se nei 15 giorni precedenti al run corrente della previsione si sono osservate precipitazioni all'interno del bacino, il sistema procede ad aggiungere alla previsione un buffer che contiene lo storico delle mappe di precipitazione simulate nei 15 giorni precedenti. La presenza del buffer consente al modello idromorfologico di ricostruire in modo adeguato il campo di umidità del suolo, affinché sia correttamente inizializzato per la generazione delle allerte in funzione degli scenari previsionali forniti.