



RAPPORTO INTERNO

Tecnologie per la sicurezza del cittadino: nowcasting

Marino Marrocu, Gabriella Pusceddu, Simone Manca, CRS4 30/09/2022

Questo rapporto descrive le attività relative allo studio, sviluppo ed implementazione di tecnologie di nowcasting o previsione meteorologica a brevissima scadenza ed applicazioni delle stesse, atte a migliorare la sicurezza del cittadino, in prospettiva per scopi di gestione del rischio conseguente a specifici eventi meteo-ambientali come ondate di calore o precipitazione intense. In questo rapporto tecnico presentiamo i modelli e la loro configurazione scelti per la previsione, lo sviluppo effettuato ed infine un esempio di come la piattaforma costruita possa essere utilizzata.

Indice

1	Introduzione	4
2	Previsione meteorologica ad alta risoluzione spaziale	6
2.1	Introduzione	6
2.2	Bolam	6
2.2.1	I dati	6
2.2.2	I modelli	7
2.2.3	La catena modellistica	8
2.2.4	Implementazione della Catena Operativa di previsione meteo a scala limitata basata su BOLAM	10
2.3	WRF e WRFDA	14
2.3.1	I dati	14
2.3.2	Il modello	14
2.3.3	La fisica di WRF	15
2.3.4	Implementazione della Catena Operativa di previsione meteo a scala limitata basata su WRF	16
2.4	WRFDA: Un esempio applicativo: il radar	17
2.4.1	La precipitazione del radar TDM	17
2.4.2	L'assimilazione	18
2.5	WRFDA: Un esempio applicativo: osservazioni convenzionali	21
2.5.1	La Temperatura della rete della Protezione Civile Italiana	21
2.5.2	Assimilazione	23
2.6	Applicazione operativa	25
2.7	Esempio di fruizione	26
2.7.1	Previsione operativa con BOLAM	27
2.7.2	Previsione WRF con assimilazione della temperatura	28
2.7.3	Previsione MOLOCH	29
3	Conclusioni	32

1 Introduzione

Lo studio e lo sviluppo delle procedure di nowcasting mira ad offrire nuove soluzioni intelligenti per aumentare l'attrattività cittadina, la gestione delle risorse e la sicurezza e qualità di vita dei cittadini, attraverso lo studio e sviluppo di tecnologie abilitanti e di soluzioni verticali innovative per la protezione, tra gli altri, dai rischi ambientali. Questo rapporto si occupa dello studio, sviluppo ed implementazione di tecnologie ed applicazioni di nowcasting per migliorare la sicurezza del cittadino, in particolare attraverso tecnologie che possano servire in prospettiva per scopi di gestione del rischio conseguente a specifici eventi meteo-ambientali come precipitazioni intense, ondate di calore o venti potenzialmente distruttivi. In questo ambito sono stati utilizzati diverse tipologie di dati, configurati diverse tipologie di modelli e sviluppati alcuni servizi che descriveremo brevemente in questa introduzione per poi discuterne ampiamente nel corpo del rapporto. Le procedure di nowcasting implementate si nutrono di tutta una serie di misure. Tra queste, i dati del radar installato e configurato all'interno del progetto TDM descritti in seguito. Un'ulteriore, e fondamentale, contributo è fornito dai dati di pubblico dominio (vedi sezione dati del capitolo 2). Nel nostro caso abbiamo utilizzato dati misurati e resi pubblici dal dipartimento nazionale della protezione civile, e dal servizio meteorologico nazionale US, in particolare i dati:

- della rete nazionale dei radar meteorologici,
- della temperatura a 2 m dal suolo sull'intero territorio nazionale ottenuti interpolando i dati della rete fiduciaria delle stazioni meteorologiche in tempo reale, e
- quelli delle previsioni numeriche del modello GFS di circolazione atmosferica a scala globale del NOAA (US).

Il layer dei modelli, utilizza come input i dati del layer precedente, ma talvolta anche quelli del layer successivo dei prodotti, in modo complesso. In dettaglio:

- i dati del modello GFS di circolazione a scala globale forniscono le condizioni iniziali e al contorno per il run dei modelli meteorologici ad area limitata BOLAM, MOLOCH e WRFDA (vedi capitolo 2)
- i dati della temperatura a 2m dal suolo interpolate su tutto il territorio nazionale, del dipartimento della protezione civile, forniscono i dati per l'assimilazione nei modelli ad area limitata ad alta risoluzione spaziale, WRFDA (vedi capitolo 2)
- le misure della precipitazione del radar TDM, forniscono i dati per l'assimilazione nei modelli ad area limitata ad alta risoluzione spaziale, WRFDA (vedi capitolo 2)

Allo stato attuale il layer finale, quello dei prodotti, è in grado di fornire:

- le previsioni del modello idrostatico BOLAM, rilasciate 2 volte su base giornaliera, che sono utili per individuare l'approssimarsi sia di ondate di calore o di gelo, sia di vento forte, e forniscono l'input per l'intervallo dei dati della sensoristica (come descritto nel rapporto tecnico "Tecnologie per la sicurezza del cittadino: sensoristica")
- l'input per la previsione della produzione energetica da fonti rinnovabili ottenuta mediante post-processing delle previsioni numeriche dei modelli meteorologici

- le previsioni su un'area limitata alla sola Sardegna ad altissima risoluzione spaziale. Questo tipo di previsione, particolarmente onerosa dal punto di vista computazionale, viene prodotta nel caso siano previsti eventi di precipitazione giudicati potenzialmente pericolosi. Il trigger a questo tipo di previsione, eseguibile con il modello WRF che con il modello MOLOCH, viene dato dall'analisi delle previsioni del modello BOLAM al livello del layer dei modelli

Nei capitoli che seguono sono descritte in dettaglio le componenti il layer dei modelli, e per ciascuno di essi sono illustrate le modalità di funzionamento in termini di input dei dati e di prodotti come output.

2 Previsione meteorologica ad alta risoluzione spaziale

2.1 Introduzione

L'attività descritta in questo rapporto tecnico ha come scopo finale quello di sperimentare tecniche di modellazione numerica e di analisi dati, integrando i dati di un radar meteorologico, allo scopo di ottenere previsioni dettagliate del verificarsi di eventi intensi di precipitazione e ondate di calore a scala di area metropolitana. Per le attività di ricerca e sviluppo, sono stati utilizzati dati aggiuntivi di pubblico dominio che serviranno ad integrare quelli collezionati nell'ambito del progetto stesso. Allo scopo, si è realizzato un sistema integrato sia per la previsione ad area limitata sino a scadenze di previsione di 48 ore che per il nowcasting ad altissima risoluzione spaziale (previsioni meteorologiche a qualche ora).

L'obiettivo è stato raggiunto implementando in primo luogo una catena meteorologica ad area limitata (mediante il modello BOLAM), descritta nella sezione 2.2, che utilizza come condizioni al contorno ed iniziali i dati GFS e fornisce su base continuativa una previsione a cadenza bi-giornaliera e ad alta risoluzione spaziale (7km) e temporale (1hr). È stata prevista anche la possibilità di "innestare" sul precedente il modello non idrostatico MOLOCH, a più alta risoluzione spaziale (circa 1km). MOLOCH, può essere eseguito opzionalmente qualora il previsore ritenga necessario aumentare la risoluzione della previsione per seguire l'evolvere di fenomeni di precipitazione particolarmente intensi.

Con la possibilità di operare a valle della prima si è implementata una seconda catena di previsione mediante il modello di pubblico dominio WRF, descritta nella sezione 2.3. Nella configurazione adottata WRF opera inglobando i dati di precipitazione ottenuti come prodotto derivato da quelli registrati da uno o più radar meteorologici e quelli dell'analisi della temperatura a 2 metri sull'intero territorio nazionale ottenuti dal dipartimento della protezione civile.

2.2 Bolam

Descriviamo in questa sezione del rapporto l'implementazione e ingegnerizzazione della catena modellistica prodotta usando il modello meteorologico BOLAM [1]. Il modello viene alimentato con i dati GFS [2] ed è stato testato ampiamente. La catena modellistica è stata implementata in versione operativa, quale strumento di previsione, essa produce quotidianamente due previsioni meteo con tempo di previsione di 48 ore.

2.2.1 I dati

Per alimentare un modello meteo ad area limitata è usuale partire dalla previsione fornita da un Modello di Circolazione Globale (GCM). La condizione iniziale e le condizioni al contorno del nostro LAM (Modello ad Area Limitata) sono fornite dalla previsione del modello GFS (Global Forecast System) sviluppato dal NCEP (National Center for Environmental Prediction), il servizio

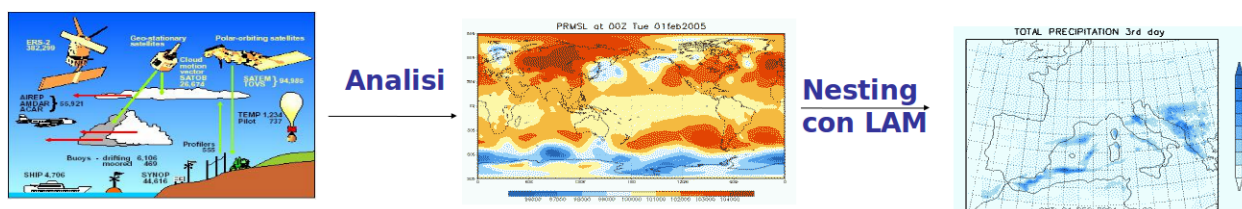


Figura 2.1: Schema di previsione di un LAM. Vedi descrizione dettagliata nel testo.

di previsione meteo degli USA. Con le misure delle variabili atmosferiche effettuate a ciascuna delle ore sinottiche (0,6,12,18), dalla WMO (World Meteorological Organisation), il centro meteo americano produce una corrispondente condizione iniziale per il proprio modello meteorologico che viene chiamata analisi. Grazie alla simulazione effettuata con questo strumento, con analisi relativa a ciascuna delle ore sinottiche, sono disponibili sull'intero globo i dati previsti per tutte le variabili atmosferiche e del suolo che alimentano le condizioni al contorno dei LAM. Nella sua configurazione operativa, il dominio del GSF è costituito dall'intero globo e la sua risoluzione orizzontale di base è di 28 chilometri, per i primi 8 giorni di simulazione. La risoluzione orizzontale scende a 70 chilometri per previsioni comprese tra una settimana e due settimane. Le previsioni NCEP, effettuate a partire dalle analisi relative alle 4 ore sinottiche, sono disponibili attraverso il NOAA National Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS) circa sei ore dopo le ore sinottiche a cui corrispondono le rispettive analisi. Quindi, per esempio, le previsioni GFS relative alle 00UTC sono rese disponibili alle 06UTC, e così via per le altre scadenze. La previsione del modello globale GFS è la base per "innestare" un LAM perchè fornisce le condizioni iniziali e al contorno della simulazione. Con il LAM possiamo così ottenere previsioni molto dettagliate su porzioni limitate del globo. Il LAM scelto per questa attività è il BOLAM. Il modello BOLAM viene utilizzato operativamente in varie agenzie nazionali italiane e servizi meteorologici regionali e viene impiegato nelle previsioni in tempo reale per conto del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile.

2.2.2 I modelli

BOLAM è un modello meteorologico idrostatico, che opera su un'area limitata del globo, sviluppato dal ISAC-CNR di Bologna [3]. Le variabili prognostiche sono le componenti del vento, la temperatura, la pressione sulla superficie, l'umidità specifica e l'energia cinetica turbolenta. Il ciclo dell'acqua è descritto per mezzo di cinque ulteriori variabili prognostiche: le nubi di ghiaccio, quelle d'acqua, pioggia, neve e la grandine. Le variabili prognostiche del modello sono distribuite nella griglia verticale con risoluzione maggiore nello strato limite atmosferico vicino alla superficie. La discretizzazione verticale è basata su un sistema ibrido di coordinate verticale, in cui le coordinate sigma terrain-following gradualmente tendono a una sistema di coordinate di pressione puro al crescere dell'altitudine. La discretizzazione orizzontale si basa su una griglia Arakawa-C sfalsata [4], in coordinate geografiche (latitudine-longitudine). Lo schema di avvezione attualmente implementato è WAF [5]. Il regime di diffusione orizzontale è del secondo ordine per tutte le variabili prognostiche, tranne la pressione superficiale. Le condizioni al contorno laterali sono applicate su un numero (tipicamente 8) di righe di punti di griglia, utilizzando uno schema di rilassamento [6] che assorbe efficacemente l'energia delle onde, contribuendo a ridurre la riflessione spuria dai confini laterali. BOLAM ha la capacità di effettuare simulazioni "annidate". La

massima risoluzione è limitata dalla approssimazione idrostatica e dalla parametrizzazione della convezione: è tipicamente circa 6-8 km. Per scale spaziali più piccole è necessario usare modelli non idrostatici. L'intero codice BOLAM è scritto in Fortran 90. E' stato parallelizzato, applicando la tecnica "decomposizione del dominio spaziale", ed è compatibile con ambienti di elaborazione paralleli mpich2 e OpenMP.

MOLOCH [7] è stato sviluppato dall'ISAC-CNR di Bologna per poter fornire previsioni spazialmente dettagliate, rappresentando esplicitamente i fenomeni convettivi. Il modello MOLOCH integra il set completo delle equazioni per un'atmosfera non idrostatica e comprimibile utilizzando come variabili prognostiche pressione, temperatura, umidità specifica, le componenti della velocità verticale e orizzontale, e cinque specie di acqua condensata. La dinamica del modello è integrata nel tempo con uno schema implicito per la propagazione verticale delle onde sonore, mentre sono espliciti e time-split gli schemi per i restanti termini. L'avvezione è calcolata utilizzando lo schema euleriano [5]. La griglia verticale è distanziata esponenzialmente con l'altezza. La microfisica è trattata sulla base della parametrizzazione proposta in [8]. I processi fisici che determinano la tendenza nel tempo dell'umidità specifica, le nubi acqua/ghiaccio e il precipitato acqua/ghiaccio sono divisi in "veloci" e "lenti". I processi veloci coinvolgono trasformazioni tra umidità specifica e le quantità di nubi, mentre quelli lenti coinvolgono la produzione e la caduta di pioggia / neve / grandine. La temperatura è aggiornata imponendo l'esatta conservazione dell'entalpia a pressione costante. La precipitazione viene calcolata con lo schema stabile e dispersivo backward/upstream in cui la velocità è funzione della concentrazione.

2.2.3 La catena modellistica

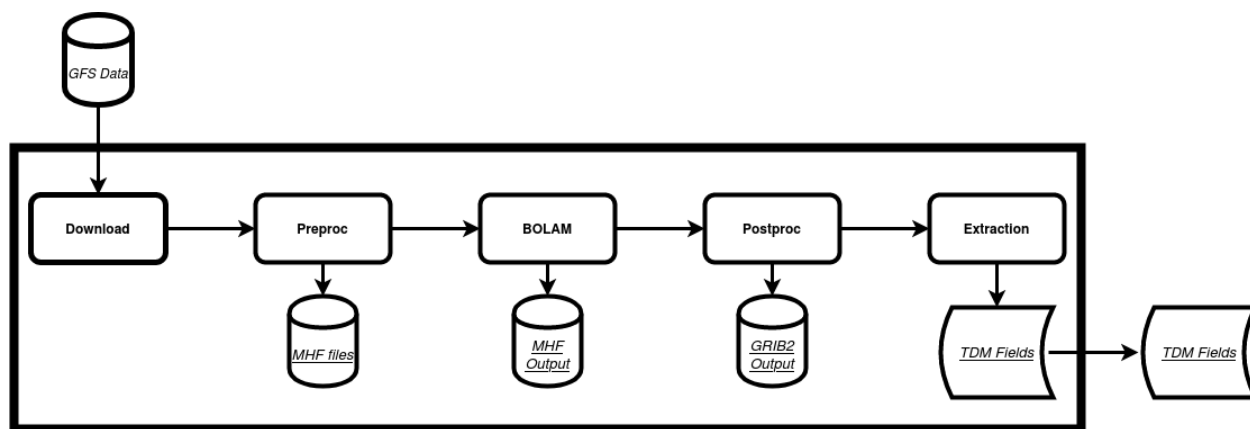


Figura 2.2: Schema della suite BOLAM. Vedi descrizione dettagliata nel testo.

Come già ricordato le previsioni NCEP, effettuate a partire dalle analisi relative alle 4 ore sinottiche, sono disponibili per i LAM attraverso il NOAA National Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS) circa sei ore dopo le ore sinottiche a cui corrispondono le rispettive analisi. A partire dal Dicembre 2019 i files forniti sono stati modificati con l'introduzione di nuovi campi, richiedendo l'introduzione di una fase di preprocessamento. Devono essere eliminati tutti i campi su livelli ibridi, tutti quelli che su livelli di pressione 0.4, 15 e 40 mb e Cloud Mixing Ratio (CLMR) al livello di 50 mb. La fase di preprocessamento dei dati GFS richiede la definizione di una griglia di calcolo per il modello BOLAM (specificata nel file prebolam.inp) e

l'interpolazione dei dati sulle condizioni iniziali e al contorno sulla questa griglia. In ingresso il software richiede quindi in input:

- dati di analisi e/o previsione del modello globale ECMWF (IFS) (formato GRIB2) [9]
- oppure dati di analisi e/o previsioni del modello globale NOAA/NCEP (GFS) (formato GRIB2)
- oppure o file MHF bolam MHF (per l'auto-nesting di BOLAM). Il formato mhf è un formato interno della suite BOLAM

Fornisce in output una serie di file in formato MHF, uno per ciascun istante per cui è presente l'input. In ciascun file sono presenti i dati di tutti i campi necessari al modello BOLAM sulla griglia precedentemente definita. Il numero di campi GFS (tipicamente 26 o 47) può variare anche tra i diversi istanti. Il software può trattare i dati di input definiti solo su un istante temporale del dominio della griglia. La griglia di input può essere definita su coordinate geografiche regolari o su coordinate ruotate, per ridurre l'effetto delle deformazioni geografiche sul dominio del modello. Se la griglia di ingresso è in coordinate ruotate, allora la griglia BOLAM sarà ruotata con lo stesso centro di rotazione. Ogni file di input (in formato GRIB2 [9]) contiene sia i dati relativi al suolo che quelli sui livelli atmosferici. La griglia di calcolo è definita dalle dimensioni lungo la longitudine, lungo la latitudine, il numero di livelli verticali, il numero di livelli nel suolo, la risoluzione in gradi e le coordinate geografiche in gradi del centro di rotazione. Occorre, inoltre, definire le coordinate ruotate in gradi dell'angolo Sud-Ovest della griglia. In caso di griglia non ruotata queste ultime definiscono le vere coordinate dell'angolo Sud-Ovest. Deve inoltre essere dichiarata la pressione di riferimento e il parametro alfa che definisce la coordinata verticale ibrida. Ultimo parametro è lo spessore degli strati di terreno. Nel preprocessamento devono essere definiti anche il numero di istanti ed il formato di input. Il modello BOLAM richiede attraverso il file di input "bolam.inp" la definizione dei parametri della fisica, per primo il passo temporale della simulazione, determinato dalla risoluzione spaziale attraverso il criterio CFL, i due parametri della diffusione di secondo ordine per temperatura e momento nell'equazione della diffusione. Inoltre occorre definire il termine di smorzamento della divergenza. I termini di smorzamento delle divergenze sono usati essenzialmente per controllare i modi di calcolo non fisici che si sviluppano alla scala delle dimensioni della griglia scelta (per un modello idrostatico sono usati per smorzare le onde di gravità). Quando questi termini non sono usati, il rumore può svilupparsi nei campi di divergenza (che possono eventualmente contaminare la previsione). Occorre definire poi la durata della previsione, l'intervallo di fornitura delle condizioni al contorno. Definire l'intervallo fra le chiamate delle routine che calcolano la radiazione e la convezione. Il numero di livelli verticali, a partire dalla sommità dell'atmosfera per i quali non vengono usate le subroutine della fisica. Il numero di aggiustamenti necessari alla routine della radiazione, il numero di linee che subiscono le condizioni al contorno, il tipo di routine usata per il calcolo della radiazione((Geleyn [10] o ECMWF [11] [12]), l'uso della parametrizzazione relativa alla convezione [13]).

La post elaborazione ha come scopo principale l'interpolazione su una griglia di output predefinita nei livelli di pressione, ma permette la selezione del formato di output, degli istanti postprocessati ed è in grado di produrre profili verticali di tutte le variabili tridimensionali in tutto il dominio oppure in parti di esso, selezionando la modalità di interpolazione. Nel postprocessing vengono inoltre selezionate le variabili di output.

2.2.4 Implementazione della Catena Operativa di previsione meteo a scala limitata basata su BOLAM

Il nowcasting deve permettere di prevedere eventi che si svolgono nell'arco di qualche ora. Questa è la ragione per cui sia la configurazione del modello che le soluzioni tecnologiche utilizzate debbano ridurre i tempi di esecuzione delle previsioni, anche in considerazione che l'analisi è disponibile solo sei ore dopo l'istante a cui corrisponde. In questo paragrafo descriveremo la catena operativa come implementata per la produzione della previsione quotidiana con la configurazione scelta e le scelte tecnologiche usate per ridurre i tempi del processamento della previsione. A partire dai dati forniti dal modello globale GFS (Global Forecast System) a 0.25° di risoluzione abbiamo definito un esperimento giornaliero di previsione dello stato dell'atmosfera attraverso l'uso del modello meteo ad aria limitata BOLAM. La catena come presentata in figura 2.2 e' costituita da uno strumento per lo scaricamento quotidiano dei dati del modello globale GFS e dal modello di calcolo vero e proprio per cui abbiamo configurato un dominio centrato sull'Italia di 578x418 punti con passo di 0.075° e 60 livelli verticali.

parametri della griglia	descrizione
DLON=0.075	Risoluzione lon
DLAT=0.075	Risoluzione lat
NLON=578	Dimensioni lon della griglia
NLAT=418	Dimensioni lat della griglia
NLEV=60	Dimensioni z atmosfera della griglia
NLEVG=7	Dimensioni z suolo della griglia
X0D=10.5	Centro di rotazione X
Y0D=43.5	Centro di rotazione Y
ALON0=-20.200	Punto Sud -Ovest X
ALAT0=-14.500	Punto Sud -Ovest Y
P0=100000.	Parametri per la griglia verticale
ALFA=2.5	Parametri per la griglia verticale
SLT1=6.E-2	Spessore primo livelli suolo
SLT2=6.E-2	Spessore secondo livelli suolo
SLT3=12.E-2	Spessore terzo livelli suolo
SLT4=18.E-2	Spessore quarto livelli suolo
SLT5=30.E-2	Spessore quinto livelli suolo
SLT6=48.E-2	Spessore sesto livelli suolo
SLT7=78.E-2	Spessore settimo livelli suolo
NLEV-ATM-INP-MAX=150	Numero massimo di livelli atmosfera
NLEV-SOIL-INP-MAX=10	Numero massimo di livelli suolo
NIST=49	Numero di istanti in input
INST-START=1	Istante iniziale
NSFC=0	Presenza di campi statici nel primo istante

Tabella 2.1: Prebolam

Questa configurazione rappresenta lo stato dell'arte della previsione deterministica operativa: l'analisi ha la risoluzione massima disponibile con dati open, il modello non idrostatico ha una risoluzione che rappresenta un compromesso tra il limite oltre il quale non sarebbe utilizzabile un

modello non idrostatico e i tempi di calcolo, il dominio, come si può vedere nella figura 2.3, racchiude tutta l'Europa e un'ampia porzione dell'oceano Atlantico e la risoluzione verticale è elevata. La configurazione operativa fornisce previsioni relative all'analisi delle 00 e delle 12, ma prevede la possibilità opzionale di fornire previsioni relativi alle 06 e alle 18. La previsione viene fornita per complessive 48 ore a scadenza oraria. Nelle tabella 2.1 che segue sono descritti tutti i parametri per il preprocessamento dei dati necessari alla previsione, mentre nella tabella 2.2 sono definiti i parametri della fisica che descrivono il modello. La configurazione della fisica di BOLAM descritta utilizza tutte le parametrizzazioni più recenti sviluppate.

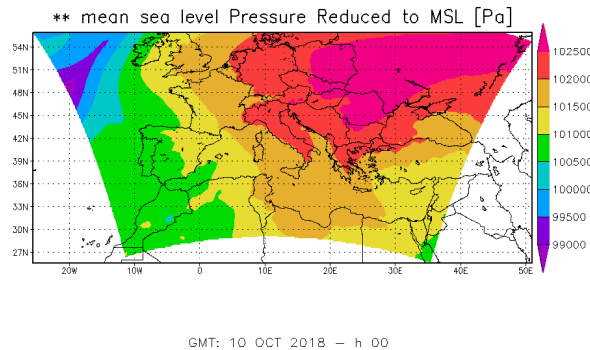


Figura 2.3: *Dominio BOLAM operativo con la pressione al livello del suolo [Pa].*

- **Il download:** per esigenze di gestione delle risorse e di sicurezza delle reti del CRS4 è stato necessario utilizzare un sistema di scaricamento dati che simulasse un crontab ma che fosse operativo sul cluster di calcolo del centro. In questo modo lo scaricamento dati GFS si presentava come un'operazione che veniva effettuata da una qualsiasi macchina (una qualsiasi disponibile) del cluster JIC ad un orario predefinito. Poiché l'analisi e i file di previsione necessari per determinare le condizioni al contorno del LAM rappresentano un totale di 68 Giga da scaricare dal server NCEP in quattro sessioni in un giorno, abbiamo adottato una diversa gestione dello scaricamento dati usando uno script python che permette di ritagliare i file sul server prima di effettuare lo scaricamento dei dati riducendo la dimensione dei dati da scaricare a circa 12G. Questo aggiornamento ha ridotto i tempi minimi di scaricamento da 15 minuti a 5 minuti ma soprattutto ha reso più robusta la procedura.
- **Il preprocessing:** il preprocessamento dei dati viene effettuato sul cluster JIC. La versione seriale impiega circa 50 minuti per produrre i file di input del modello. Ma è stata implementata una versione che permette di effettuare il calcolo parallelamente per ciascuno dei 49 istanti del preprocessamento riducendo a meno di 5 minuti il tempo di processamento.
- **Il processing:** dal punto di vista computazionale il run del modello è la parte più pesante della catena operativa. Il modello in questa configurazione impiega su un unico core circa 3 ore. Per ridurre i tempi di calcolo abbiamo optato per una versione parallela: il tempo di esecuzione minore, come evidente dalla immagine 2.4 è di 310 s (meno di 6 minuti) utilizzando 128 core. Benchè il JIC abbia una maggiore disponibilità di core, la suddivisione in 128 sottodomini è il limite oltre il quale il vantaggio della parallelizzazione si annulla, probabilmente perché l'effetto del numero di operazioni eseguite al di fuori del sottodominio

parametri fisica	descrizione
dtstep = 60.	risoluzione temporale
anu2 = 0.06	diffusione di 2° temperatura
anu2v = 0.06	diffusione di 2° momento
ddamp = 0.085	smorzamento della divergenza
hrun = 48	durata della previsione
hbound = 1	intervallo condizioni al contorno
mradconv = 18	intervallo chiamate radiazione
nradm = 2	intervallo chiamate convezione
ntop = 4	livelli verticali senza fisica.
nadj = 4	aggiustamenti della radiazione
nbl = 8	linee per le condizioni al contorno
nlcadj = .t.	parametriz. della convezione
nlbfix = .f.	condizioni al contorno fisse

Tabella 2.2: Fisica di BOLAM.

prevale su quelle effettuate in relazione agli altri sottodomini. Abbiamo effettuato un serie di test per verificare se ci fosse una differenza importante di performance del modello in funzione del numero di core per nodo utilizzati. Dall'analisi dei dati tabella 2.1, emerge un leggero aumento dei tempi di calcolo all'aumentare del carico del nodo: da 310 s nella configurazione di utilizzo del cluster con 4 task per nodo a 342 s con 24 task per nodo. La configurazione operativa attuale utilizza 32 core, con tempi di calcolo dell'ordine di 14 minuti.

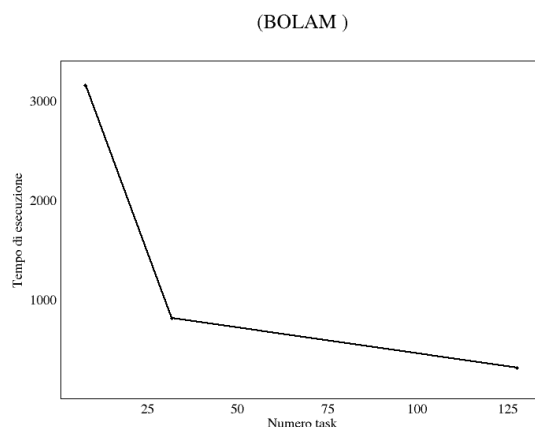


Figura 2.4: Tempi di esecuzione del modello BOLAM sul cluster JIC. Vedi descrizione dettagliata nel testo.

- Il post processing: il post-processamento dei dati ottenuti da BOLAM che rende disponibili in output i file visualizzabili, occupa circa 25 minuti per produrre 49 file, uno per ognuna delle 48 ore della previsione più quello per la condizione iniziale. Il tempo di processamento come accennato per il preprocessamento può ridursi fino a circa 1 minuto, operando in parallelo, in funzione della disponibilità dei nodi del cluster. I tempi di esecuzione della versione operativa della catena meteo BOLAM sono attualmente di circa 1h e 45 minuti che possono

Task totali	4 t/n	8 t/n	16 t/n	24 t/n
8	3149 s			
32	809s			
128	310s	323s	356s	342s

Tabella 2.3: *Performance BOLAM.*

essere ridotti all'occorrenza a circa 30 minuti. Riteniamo 30 minuti un tempo ragionevole per una previsione, anche nel contesto di previsioni operative di fenomeni che evolvono velocemente

In questo paragrafo riportiamo i tempi di esecuzione del modello non idrostatico MOLOCH. Questo modello, benché non venga eseguito quotidianamente, può essere eseguito opzionalmente qualora il previsione ritenga necessario aumentare la risoluzione della previsione per seguire l'evolvere di particolari fenomeni meteorologici, come per esempio quelli di precipitazione intensa, meglio descritti da un modello non idrostatico.

Per questioni di spazio, non riporteremo i dettagli dell'implementazione di MOLOCH, anche perché molto simili a quelli di BOLAM, ma solo alcuni fondamentali parametri della nostra implementazione. La catena del modello non idrostatico MOLOCH, è configurata con un dominio centrato sull'Italia con 1156x1154 punti di griglia e una risoluzione orizzontale 0.0114°, cui corrisponde una maglia di circa 1km, 60 livelli verticali e 7 livelli nel suolo. L'analisi è basata sull'output di della Catena Operativa BOLAM a 3h dall'inizio della previsione principale (ossia quella effettuata con BOLAM) mentre le condizioni al contorno sono fornite ogni ora per un totale di 45 h. I tempi di esecuzione del modello che rappresenta lo stadio computazionalmente più rilevante della catena sono di 1264 s (22 minuti) su un totale di 768 task, 24 per nodo del cluster JIC. I tempi di esecuzione in funzione del numero di task sono descritti dalla figura 2.5. Il tempo stimato di circa 20 minuti non tiene conto della fase di pre e post processing che se eseguite serialmente comportano tempi di esecuzione molto più elevati dello stesso run di previsione. Tuttavia queste porzioni della catena operativa posso essere eseguite parallelamente all'esecuzione del run di BOLAM per quanto riguarda il pre-processing, e al run dello stesso MOLOCH per il post-processing. Questo ci porta a concludere che disponendo delle necessarie risorse di calcolo e dopo opportuna ingegnerizzazione dell'intera catena il MOLOCH è in grado di produrre una previsione numerica completa in circa mezz'ora un tempo di sicuro interesse per l'operatività in configurazione nowcasting.

Task totali	16 t/n	24 t/n
192	4804s	
256	3708s	
576	1509s	1424s
768		1264s

Tabella 2.4: *Performance MOLOCH*

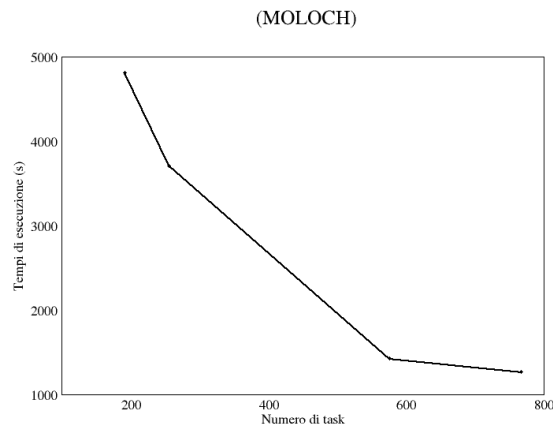


Figura 2.5: Tempi di esecuzione del modello MOLOCH sul cluster JIC. Vedi descrizione dettagliata nel testo.

2.3 WRF e WRFDA

2.3.1 I dati

Anche per il modello WRF le condizioni iniziali e al contorno sono fornite dalle previsioni a scala globale del Global Forecast System (GFS) [14], il modello di previsione meteorologica creato dal NCEP (National Center for Environmental Prediction).

2.3.2 Il modello

Il modello ad aria limitata WRF è stato sviluppato da un partenariato collaborativo statunitense costituito dal National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Oceanic and Atmospheric Administration (rappresentato dal National Centres for Environmental Prediction (NCEP) e il (poi) Forecast Systems Laboratory (FSL)), (l'allora) Air Force Weather Agency (AFWA), il Naval Research Laboratory, l'Università dell'Oklahoma e la Federal Aviation Administration (FAA). Tutte le informazioni relative al suo uso possono rivacarsi in [15]

Il modello è un sistema di previsione meteorologica numerica a mesoscala di nuova generazione progettato per la ricerca atmosferica e per le applicazioni di previsione operativa. È dotato di due core dinamici, un sistema di assimilazione dati e un'architettura software che supporta il calcolo parallelo. Il modello viene usato per una vasta gamma di applicazioni meteorologiche su scale da decine di metri a migliaia di chilometri. WRF offre nel settore delle previsioni operative una piattaforma flessibile ed efficiente dal punto di vista computazionale, avendo inglobato i recenti progressi sia per quanto riguarda le parametrizzazioni fisiche, la numerica e le metodologie per l'assimilazione dei dati, forniti della comunità scientifica. WRF è attualmente in uso operativo presso l'NCEP e altri centri meteorologici nazionali, nonché in configurazioni di previsione in tempo reale presso laboratori, università e aziende private.

WRF ha una grande comunità mondiale di utenti registrati, un totale cumulativo di oltre 39.000 in oltre 160 paesi.

Il set di equazioni base del modello WRF, chiamato ARW (Advanced Research WRF), descrive la fisica di un fluido completamente comprimibile, euleriano e non idrostatico con anche l'opzione

idrostatica, conservativo per le variabili scalari. Utilizza coordinate verticali di pressione idrostatica che seguono il terreno e che terminano nel confine superiore con una superficie a pressione costante. La griglia orizzontale è la griglia Arakawa-C[4]. Lo schema di integrazione temporale utilizza lo schema Runge-Kutta del terzo ordine, e la discretizzazione spaziale impiega schemi di ordine dal 2° al 6°. Il modello supporta sia applicazioni idealizzate che reali con varie modalità per l'imposizione delle condizioni al contorno. Supporta anche modalità di annidamento (nesting) unidirezionali (one way), bidirezionali (two ways) e con dominio a risoluzione variabile. Funziona su computer a singolo processore, condiviso e a memoria distribuita. WRF offre oltre al solutore dinamico una serie di componenti il cui scopo è quello di generare file di input (analisi) e condizioni al contorno, in qualche modo "ottimali", per il modello. Questo sistema genera la condizione iniziale dei campi 3d e 2d del modello anche attraverso un aggiustamento del bilancio idrostatico. Il modello WRF supporta un set completo di opzioni per la fisica e il nudging dell'analisi e/o delle osservazioni. Il sistema di pre-processing ha il compito di definire la griglia WRF, a partire dall'analisi di dati reali e previsioni di un modello globale, interpolare i dati di input sulla griglia e generare informazioni sull'elevazione e sul terreno nel dominio. I campi dipendenti dal tempo, ottenuti dall'integrazione del modello, sono costituiti da vento 3d, temperatura potenziale, vapore acqueo e un certo numero di campi 2d [8], [10]. La WRF-3dVar e WRF-4dVar possono essere utilizzate per assimilare le osservazioni nella condizione iniziale del modello. L'assimilazione dei dati è la tecnica con cui le osservazioni sono combinate con il prodotto di un modello meteorologico (la prima ipotesi o previsione di fondo) e le rispettive statistiche di errore per fornire una stima migliore (l'analisi) dello stato atmosferico. L'assimilazione variabile (Var) dei dati raggiunge questo obiettivo attraverso la minimizzazione iterativa di una funzione costo. Le differenze tra l'analisi e le osservazioni sono smorzate in base al loro errore. A differenza dell'assimilazione di dati tridimensionali (3D-Var), l'assimilazione quadridimensionale (4D-Var) richiede l'uso di un modello numerico di previsione per la valutazione dell'errore e la sua minimizzazione durante un certo intervallo temporale, chiamato finestra di assimilazione. L'uscita standard dal modello WPS, reale e WRF è in formato netCDF (uno dei formati WRF I/O).

In figura 2.6 è schematizzato l'insieme degli strumenti forniti con WRF. Sulla sinistra i dati di input che possono essere forniti al modello. A WRFDA possono essere forniti dati radar (Alternative Obs Data) e osservazioni convenzionali. Il modulo obsgrid fornisce uno strumento per generare il formato supportato da WRFDA. Al modello WRF possono invece essere forniti le informazioni sul terreno e i dati provenienti da un modello globale. Queste informazioni vengono distribuite sulla griglia orizzontale dal modulo WPS ed infine distribuite sulla griglia verticale dal modulo REAL. Il modulo ARW MODEL è il solutore e, come già detto, può essere richiamato dal modulo di assimilazione WRFDA-4DVar. Sulla destra sono invece raffigurati i vari strumenti utili per la visualizzazione dei dati di I/O.

2.3.3 La fisica di WRF

Quello che segue è una breve elencazione delle parametrizzazioni fisiche fondamentali utilizzate in WRF [16] [17], che serve anche a farsi un'idea della complessità del modello:

- cumulus and shallow convection (14 parametrizzazioni)
- planetary boundary layer (11 opzioni)
- surface layer (6 opzioni)

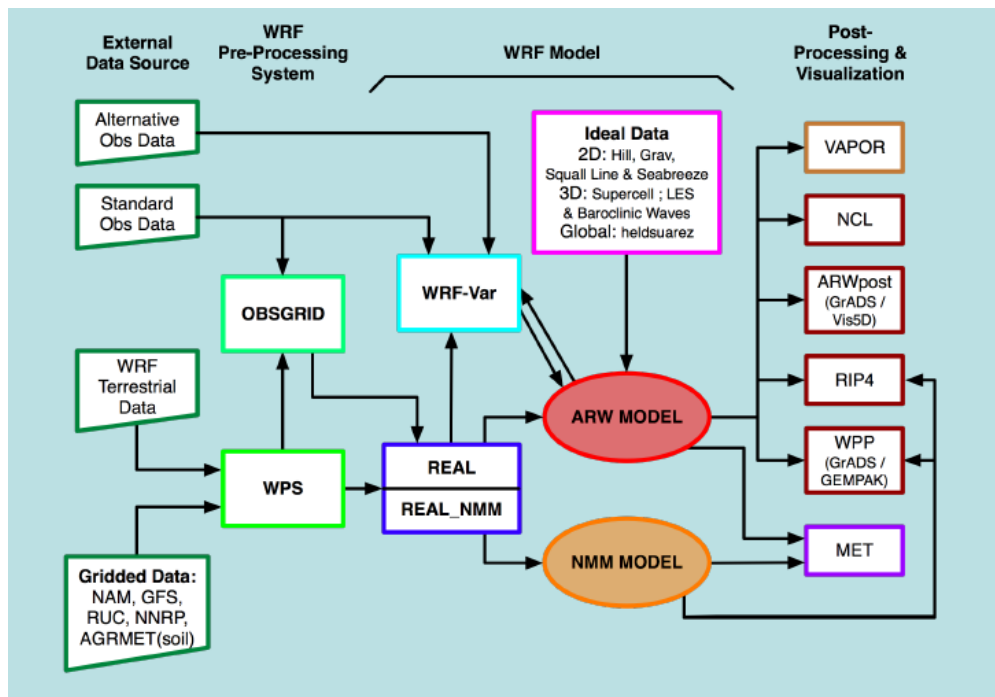


Figura 2.6: Schema della suite WRF. Vedi descrizione dettagliata nel testo.

- land-surface (14 opzioni)
- longwave radiation (5 parametrizzazioni)
- shortwave radiation (6 parametrizzazioni)
- ocean physics (2 parametrizzazioni)
- sub-grid turbulence (5 parametrizzazioni)
- categorizzazione land-use per la caratterizzazione delle proprietà della superficie
- aggiornamento della maschera sea-ice e dell'albedo durante le lunghe simulazioni
- analysis mediante nudging, sia 3D che superficiale
- nudging mediante aggiustamento dei flussi alla superficie
- nudging delle osservazioni
- nudging spettrale mediante uso di analisi su griglia regolare

2.3.4 Implementazione della Catena Operativa di previsione meteo a scala limitata basata su WRF

In primo luogo si è implementato il modello WRF nella sua configurazione “standard”, senza cioè l'utilizzo del modulo di assimilazione dati. A partire dai dati forniti dal modello globale GFS [2] (Global Forecast System) a 0.25° di risoluzione abbiamo definito un esperimento giornaliero di previsione dello stato dell'atmosfera. Il sistema di previsione è costituito da uno strumento per lo scaricamento quotidiano dei dati del modello globale GFS e dalla catena di previsione che è stato configurata in un dominio centrato sull'Italia con griglia orizzontale di dimensioni 578×418 punti, passo di griglia di 0.075° (circa 7km di risoluzione orizzontale) e 50 livelli verticali. È stata usata l'analisi delle 00 per l'inizializzazione del modello, mentre le condizioni al contorno sono state

fornite ogni ora per un totale di 48 h. I tempi di esecuzione sono in media di 5h su una macchina di un cluster linux.

2.4 WRFDA: Un esempio applicativo: il radar

2.4.1 La precipitazione del radar TDM

Il progetto TDM mette a disposizione i dati di un radar X-band posizionato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale ed Architettura dell'Università di Cagliari [18]. I dataset derivanti dalle immagini radar contengono le misure effettuate in un raggio di circa 30 km centrato sulle coordinate (39.23 9.11). Il radar acquisisce un'immagine ogni minuto, solo in caso di pioggia. Il dato registrato, per retrodiffusione, è la potenza ricevuta che viene poi trasformata in riflettività, da cui può essere ricavata, attraverso la relazione di Marshall e Palmer l'intensità di precipitazione in mm/h. L'intensità di precipitazione oraria è rappresentato da una matrice 1024x1024 definita su una griglia regolare (60mx60m) il cui dominio di circa 60 km di lato ha al centro la posizione del radar stesso. Il dominio utile è in realtà una circonferenza, centrata sulla posizione del radar e di raggio 30 km. La griglia spaziale è disponibile sia nel sistema di coordinate originali (EPSG:3003 - Monte Mario/Italy zone 1) che in longitudine-latitudine (EPSG:4326 - WGS 84). I dati delle sequenze sono poi messi a disposizione come dataset in formato netCDF4, ciascun file contiene l'intensità di precipitazione cumulata alle ore sinottiche (00,06,12,18 UTM)

2.4.1.1 Preparazione di dati

Lo strumento di assimilazione della suite WRF (WRFDA) è stato sviluppato per assimilare diversi tipi di osservazioni: osservazioni convenzionali, dati da satellite, intensità di precipitazione o riflettività e velocità Doppler da radar meteorologico. L'assimilazione può essere o solo spaziale (3DVar) o spazio temporale (4DVar) [19] [20]. Per quanto riguarda l'assimilazione dell'intensità di precipitazione, WRFDA è in grado di assimilare nella modalità 4DVar esclusivamente il prodotto NCEP noto come Stage IV analysis [21]. Questo prodotto è l'esito della composizione dell'analisi prodotta dall'uso di dati da radar e da sensore su scala regionale. Esso viene fornito su una griglia polare stereografica con risoluzione di 4 km. La suite WRF fornisce uno strumento per trasformare l'analysis Stage IV in un formato ascii che possa essere dato in pasto a WRFDA: `precip_converter.exe`. Per poter assimilare i dati di precipitazione forniti dal Radar del progetto TDM è stato necessario: effettuare lo sfoltimento della griglia del radar (mediante una opportuna procedura di upscaling) e modificare il convertitore di formato. Lo sfoltimento risulta necessario per trovare un compromesso tra la i tempi di esecuzione del processo di assimilazione e la risoluzione spaziale dell'informazione fornita allo stesso processo. Poiché il dominio del radar è molto piccolo rispetto al dominio di integrazione di WRF necessario per ottenere una simulazione attendibile, abbiamo scelto di ridurre la griglia regolare del radar TDM da 1024x1024 punti (60mx60m) ad una griglia regolare del modello WRF che potesse fornire una previsione attendibile, come quella effettuata per i confronti con le simulazioni effettuate con il modello BOLAM. La griglia finale è stata ridotta a 8X8 punti (7.5kmx7.5km). Il convertitore di formato è stato modificato per avere in input un file ASCII contenente latitudine e longitudine del punto di griglia considerato e il corrispondente valore di intensità di precipitazione cumulata sulle 6h. È stato così fornito al modulo di

assimilazione un file con i dati del radar TDM ma con un formato identico a quello del prodotto Stage IV analysis.

2.4.2 L'assimilazione

Il prodotto finale dell'assimilazione dati è un'analisi che sia la migliore approssimazione possibile dello stato dell'atmosfera all'istante considerato secondo un criterio numerico che consiste essenzialmente nel minimizzare la differenza quadratica tra valori osservati e simulati dal modello nella finestra temporale di assimilazione. Oltre all'informazione relativa ai dati di intensità di precipitazione nel dominio del radar che abbiamo descritto nel paragrafo precedente, occorrono a WRFDA 4DVar [22], una prima ipotesi dello stato dell'atmosfera (first guess), la matrice di covarianza dell'errore di background e le condizioni al contorno per gli istanti successivi al primo.

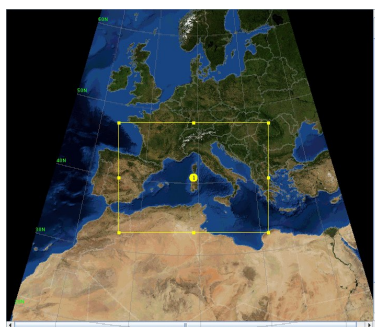


Figura 2.7: *Dominio della simulazione "first guess".*

La "prima ipotesi" per noi è la condizione iniziale di una simulazione WRF centrata sulla Sardegna con passo di griglia di 15 km (157x115 punti griglia) e 32 livelli verticali che evolve per le successive 6 h. Le condizioni iniziali e al contorno sono fornite dal modello globale GFS. La matrice di covarianza `be.dat.cv3` viene fornita dalla suite WRF per una condizione generale. La condizione al contorno viene fornita dalla simulazione che abbiamo chiamato "prima ipotesi". Al processo di assimilazione vengono fornite, attraverso il `namelist.input`, le modalità di esecuzione ossia il modo in cui usare le informazioni di input. La prima opzione abilitata è l'assimilazione 4d: `var4d=true`. Un'altra opzione fondamentale da fissare è `var4d_lbc=false`. Questa opzione permette di scegliere una configurazione in cui le condizioni al contorno non vengono usate come variabili di controllo; qualora si volesse cambiare questa opzione sarebbe necessario fornire un ulteriore file di input che contiene la "prima ipotesi" anche per l'istante finale della finestra di assimilazione, cioè dell'intervallo di tempo in cui vengono forniti dati osservati alla simulazione. Per definire la finestra di assimilazione occorre definire alcune variabili in una sezione del `namelist` che si chiama `time_control`:

```
analysis_date, time_window_min e start_xxx time_window_max end_xxx run_hours
```

la prima rappresenta l'istante temporale dell'analisi di cui si vuole avere la migliore approssimazione possibile dello stato dell'atmosfera; la seconda e la terza, rappresentano l'istante iniziale della finestra di assimilazione e devono sempre essere uguali tra loro; devono essere uguali tra loro anche la quarta e la quinta opzione, che rappresentano l'istante finale della finestra di assimilazione; `run_hours`, la differenza tra `start_xxx` e `end_xxx`, è la lunghezza della finestra temporale di assimilazione dati. Per noi la finestra di assimilazione è stata fissata a 6h. Le opzioni `var4d_bin` e `var4d_bin_rain` rappresentano rispettivamente la lunghezza della sottofinestra di osservazione in

secondi; e la lunghezza della sottofinestra di osservazione delle precipitazioni in secondi. Per noi entrambe sono 3600s L'opzione `use_rainobs=.true.` definisce l'assimilazione diretta della precipitazione da radar L'opzione `check_max_iv=.true.` determina la selezione delle osservazioni nella simulazione. Le osservazioni vengono assimilate solo se differiscono dal background (O-B) meno di un valore massimo definito come un multiplo dell'errore di osservazione per ogni osservazione; il valore massimo predefinito è 5 volte l'errore di osservazione La variabile `Ntmax` rappresenta il massimo numero di iterazioni nel processo di minimizzazione. Per noi è 30. La variabile `cv_options=3` determina la selezione del Background Error model. Il numero 3 configura Background Error model di NCEP

2.4.2.1 La nuova analisi

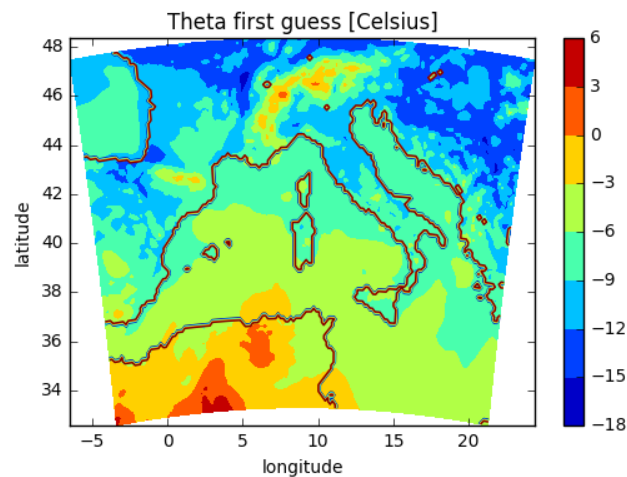


Figura 2.8: Analisi del campo di temperatura potenziale per il livello più vicino al suolo senza assimilazione (*first guess*).

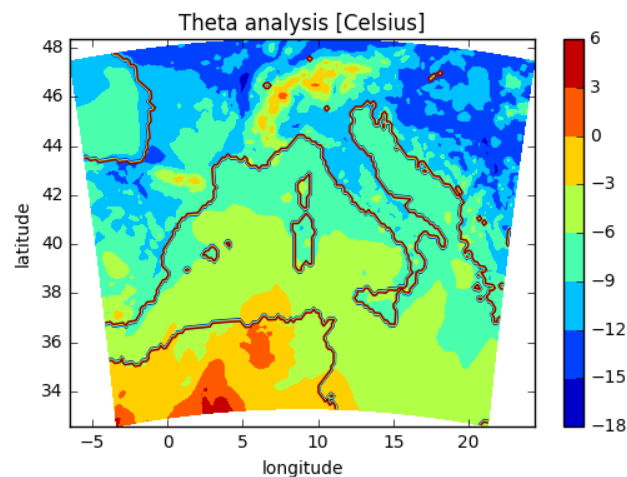


Figura 2.9: Analisi del campo di temperatura potenziale per il livello più vicino al suolo con assimilazione (*analysis*).

L'effetto della procedura di assimilazione sull'analisi del campo di temperatura potenziale nel livello più vicino al suolo è evidenziato nelle due figure 2.8 2.9 dove sono riportati i campi senza assimilazione e con assimilazione. Come si può vedere il campo finale sembra non differire visivamente. Questo fa capire come l'effetto di una informazione su un'area ridotta rispetto alle dimensioni del dominio, come è quella del radar TDM, circa 3600 km^2 di informazioni su un dominio di $2355 \text{ km} \times 1725 \text{ km}$ cioè 4062375 km^2 risulti essere una piccolissima perturbazione. Dalla differenza fra i due campi di temperatura potenziale descritti sopra, che vediamo in figura 2.10, risulta che la perturbazione è piccola ma non inesistente, come ci si aspetterebbe aggiungendo informazioni molto localizzate. In queste condizioni l'effetto della assimilazione di dati locali influisce in modo quasi impercettibile sull'analisi; la legenda della figura 2.10 evidenzia come le differenze di temperatura potenziale, originatesi proprio nella zona in cui sono presenti le informazioni del radar, cioè intensità e localizzazione delle precipitazioni, siano dell'ordine di 0.01 C.

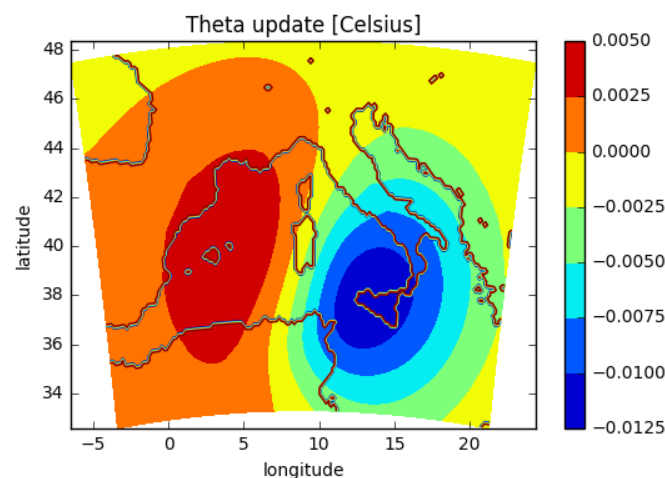


Figura 2.10: Differenza fra l'analisi del campo di temperatura potenziale per il livello più vicino al suolo senza e con assimilazione (update)

2.4.2.2 Il nuovo forecast

A partire dalla nuova analisi, prodotta dalla procedura di assimilazione, è possibile ottenere un nuovo forecast, che parte dalla condizione iniziale perturbata. Per far partire il nuovo forecast, oltre all'analisi che proviene dal processo di assimilazione, occorre generare le nuove condizioni al contorno. WRFDA a questo scopo fornisce uno strumento che si chiama `da_update_bc.exe`. Quando si utilizza un'analisi WRFDA (`wrfvar_output`) per eseguire una previsione WRF, è essenziale aggiornare le condizioni al contorno che sono contenute nel file `wrfbdy_d01`. Il dominio più grande, se c'è un nesting, deve essere sempre aggiornato per essere coerente con la nuova analisi perturbata, altrimenti il forecast avrà discontinuità e sarà di scarsa qualità al bordo. Se viene utilizzato il nesting, per i domini più interni le condizioni al contorno sono fornite dai domini principali, quindi non è necessario l'aggiornamento delle condizioni al contorno. Il programma `da_update_bc.exe` richiede tre file di input: l'analisi WRFDA (`wrfvar_output`), il file `wrfbdy` e un file `namelist.input`. Ottenute le condizioni al contorno perturbate nel nuovo file `wrfbdy`, che sovrascrive il precedente, è possibile produrre il nuovo forecast. Il forecast, che ha come input: l'analisi WRFDA e il nuovo

wrfbdy fornisce una nuova previsione, che include le informazioni sulle misurazioni assimilate. L'effetto della procedura di assimilazione sul forecast, alla sesta ora di previsione, del campo di precipitazione è evidenziato in 2.11 dove sono riportata la differenza fra il campo senza assimilazione e quello con assimilazione. Come si può vedere sono evidenti differenze: sia zone in cui la precipitazione aumenta, che zone in cui la precipitazione diminuisce. In particolare sono visibili piccoli spot in cui la variazione è importante: nell'immagine sono zone piccolissime rosse o blu. L'immagine presenta, ad esempio, uno spot rosso sopra le Baleari, che attribuiamo all'accumulo di umidità in una zona, in cui era presente anche nel forecast imperturbato una zona di precipitazione intensa.

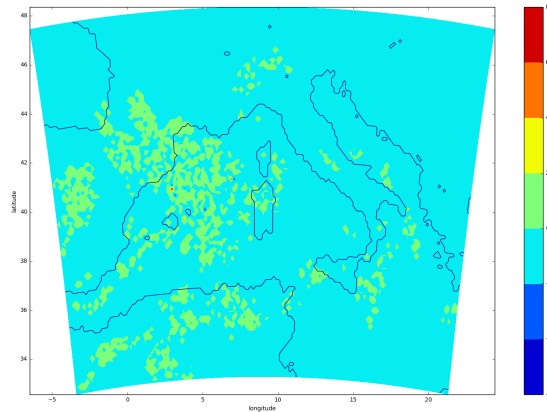


Figura 2.11: *Differenza fra il forecast del campo di precipitazione, dopo 6h, senza e con assimilazione*

2.5 WRFDA: Un esempio applicativo: osservazioni convenzionali

2.5.1 La Temperatura della rete della Protezione Civile Italiana

Il Dipartimento della protezione civile nazionale mette a disposizione in [23] dati di temperatura e intensità di precipitazione, fulminazioni, copertura nuvolosa, intensità del vento. I dati resi disponibili sono il frutto dell'elaborazione, in tempo reale, di dati grezzi provenienti dalla rete radar nazionale, dalla rete delle stazioni pluviometriche e termometriche, dai dati satellitari e dalla rete di fulminazioni. I dati disponibili sono VMI (Vertical Maximum Intensity) e SRI (Surface Rainfall Intensity) che identificano regioni di attività intensa per le precipitazioni. Disponibile ogni 5 minuti; TEMP l'elaborazione su griglia regolare delle misure delle temperature registrate al suolo dalle stazioni termometriche. Disponibile ogni 60 minuti; SRT (Surface Rainfall Total), i cumulati di precipitazioni delle ultime 1,3,6,12, 24 ore. Il dato fornito viene elaborato a partire dai dati della rete radar e dai i dati delle stazioni pluviometriche. Disponibili rispettivamente ogni 1,3,6,12, 24 ore60. DPC - IR (Infrared) 10.8 che rappresenta la copertura nuvolosa attraverso l'elaborazione di un dato satellitare sul canale dell'infrarosso. Disponibile ogni 5 minuti; LTG (Lightning) ossia la mappa dei fulmini. Disponibile ogni 10 minuti; WIND AMV (Atmospheric Motion Vector) che fornisce direzione e l'intensità del vento in quota (dato satellitare). Disponibile ogni 20 minuti; DPC - HRD (Heavy Rain Detection), è un prodotto che individua le aree dove

sono in corso fenomeni intensi di precipitazione. Disponibile ogni 5 minuti. I dati descritti sono disponibili come immagini in formato tiff

2.5.1.1 Preparazione dei dati

Lo strumento di assimilazione della suite WRF (WRFDA) è in grado di assimilare diversi tipi di osservazioni convenzionali. L'assimilazione può essere o solo spaziale (3DVar) o spazio temporale (4DVar) [19] [20]. Per quanto riguarda l'assimilazione delle misure a terra della temperatura, WRFDA è in grado di assimilare esclusivamente dati forniti nel formato LITTLE_R [24], mentre il campo di temperatura fornito dalla protezione civile si presenta come un'immagine in formato tiff. Abbiamo sviluppato un convertitore python per trasformare l'immagine tiff in dati numerici

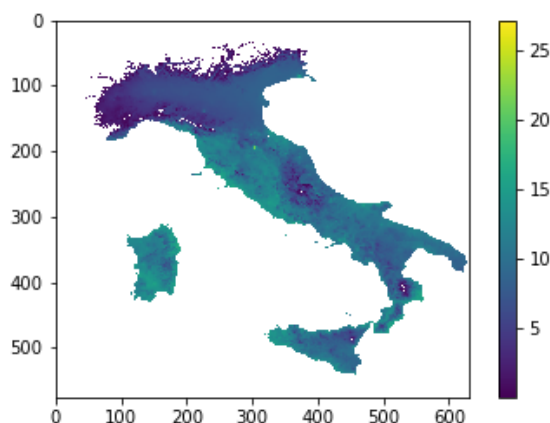


Figura 2.12: Il campo di temperatura fornito dalla protezione civile

csv, introducendo la geolocalizzazione del dato e quindi producendo in output un dato numerico geolocalizzato per la temperatura: `tiff_to_geocsv`. Per poter assimilare questo campo di temperatura abbiamo sviluppato un software per il cambio di formato da csv a LITTLE_R: `csv_to_littler`. LITTLE_R è un formato di file per le osservazioni convenzionali basato su ASCII, sviluppato dagli sviluppatori di WRF agli albori del progetto. Poiché i file di dati di osservazione grezzi hanno molti formati possibili, come nel nostro caso, LITTLE_R è progettato per essere un formato intermedio in modo che WRFDA possa essere in grado di assimilare il maggior numero possibile di tipi di osservazione. Si tratta di un formato di file basato sui report (gli output degli strumenti di misura dei dati convenzionali), per cui tutti i tipi di osservazione possono essere uniti insieme in un file di testo per essere assimilati. Il convertitore di formato è stato sviluppato per avere in input un file ASCII contenente latitudine e longitudine ed eventualmente orografia del punto di griglia considerato e il corrispondente valore di temperatura. È stato così prodotto per il modulo di assimilazione un file con i dati di temperatura in formato LITTLE_R. La suite WRF fornisce uno strumento, OBSPROC [22], per produrre, infine, il file di input del modulo di assimilazione WRFDA. Lo scopo di OBSPROC è quello di rimuovere le osservazioni al di fuori dei domini temporali e spaziali specificati, riordinare e unire i rapporti dei dati duplicati (nel tempo e nel luogo), controllare la pressione o l'altezza in base alle informazioni date dalla geolocalizzazione, controllare, se esistono, le osservazioni a più livelli per verificare la consistenza verticale, assegnare gli errori di osservazione sulla

base di un file di errore predefinito e scrivere il file di osservazione da utilizzare da parte della WRFDA in formato ASCII.

2.5.2 Assimilazione

Come descritto nella sezione assimilazione della sezione precedente il prodotto finale dell'assimilazione dati è un'analisi che sia la migliore approssimazione possibile dello stato dell'atmosfera con le perturbazioni fornite dall'introduzione delle nuove misure, in questo caso di temperatura. Oltre all'informazione relativa al campo di temperatura, descritta nel paragrafo precedente, occorrono a WRFDA 4DVar [22], una prima ipotesi dello stato dell'atmosfera (first guess), la matrice di covarianza dell'errore di background le condizioni al contorno per gli istanti successivi al primo. La "prima ipotesi" (first guess) per noi è la condizione iniziale di una simulazione WRF centrata sulla Sardegna con passo di griglia di 15 km (157x115 punti griglia) e 32 livelli verticali che evolve per le successive 48 h. Le condizioni iniziali e al contorno della "prima ipotesi" sono fornite dal modello globale GFS. La matrice di covarianza `be.dat.cv3` viene fornita dalla suite WRF per una condizione generale. La condizione al contorno viene fornita dalla simulazione che abbiamo chiamato "prima ipotesi". Nel file di configurazione abbiamo definito le modalità di assimilazione. Abbiamo optato per un'assimilazione spazio-temporale ossia 4d-var var. L'istante (analisi) di cui vogliamo avere la migliore approssimazione possibile dello stato dell'atmosfera è l'istante iniziale della simulazione first guess; l'istante iniziale della finestra di assimilazione è anch'esso l'istante iniziale della simulazione; abbiamo fissato l'istante finale della finestra di assimilazione 6 ore dopo l'inizio della simulazione; la lunghezza della finestra temporale di assimilazione dati è quindi di 6 ore. Abbiamo selezionato la modalità in cui vengono assimilate le osservazioni convenzionali. Le osservazioni vengono assimilate solo se differiscono dal background (O-B) meno di un valore massimo definito come un multiplo dell'errore di osservazione per ogni osservazione; il valore massimo predefinito è 5 volte l'errore di osservazione. Abbiamo definito in 30 il massimo numero di iterazioni nel processo di minimizzazione. Abbiamo selezionato il Background Error model di NCEP.

2.5.2.1 La nuova analisi

L'effetto della procedura di assimilazione sull'analisi del campo di pressione al livello del suolo è visualizzata nella figura 2.13 che rappresenta il campo di pressione al livello del suolo senza assimilazione e con assimilazione. Come si può vedere i due campi differiscono visivamente. Nella zona in cui la differenza è più evidente, rappresentate in rosso nell'immagine se la differenza è positiva, la differenza è di 0.7hPa; mentre le zone in cui la pressione è più bassa, rappresentate in blu, raggiungono al massimo 0.5 hPa. La differenza fra i due campi dimostra che la perturbazione è piccola ma non inesistente. In queste condizioni l'effetto dell'assimilazione di dati influisce sull'analisi e il suo effetto risulta essere amplificato nell'evoluzione della simulazione.

2.5.2.2 Il nuovo forecast

L'analisi perturbata, prodotta dalla procedura di assimilazione, diventa la condizione iniziale perturbata per un nuovo forecast, in cui anche le condizioni al contorno sono state uniformate al processo di assimilazione che proviene dal processo di assimilazione; WRFDA a questo scopo

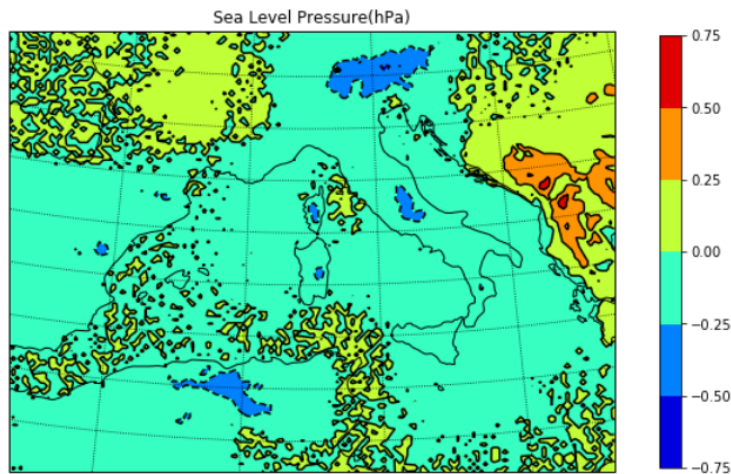


Figura 2.13: *Differenza fra i campi di pressione al livello del suolo con e senza assimilazione.*

fornisce uno strumento che si chiama `da_update_bc.exe`. Il forecast, che ha come input: l'analisi WRFDA e le nuove condizioni al contorno fornisce una nuova previsione, che include le informazioni sulle misurazioni assimilate. L'effetto della procedura di assimilazione sul forecast, alla sesta ora di previsione, del campo di temperatura al livello del suolo (TSK Surface skin temperature) è evidenziato in figura 2.14 dove è riportata la differenza fra il campo senza assimilazione e quello con assimilazione. Come si può vedere ci sono evidenti differenze: sia zone in cui la temperatura aumenta, che zone in cui la temperatura diminuisce. In particolare sono visibili zone in cui la variazione è elevata: nell'immagine sono zone rosse o blu. L'immagine presenta, ad esempio, uno spot rosso sulle coste francesi. In ultimo nella figura 2.15 le differenze tra le previsioni con

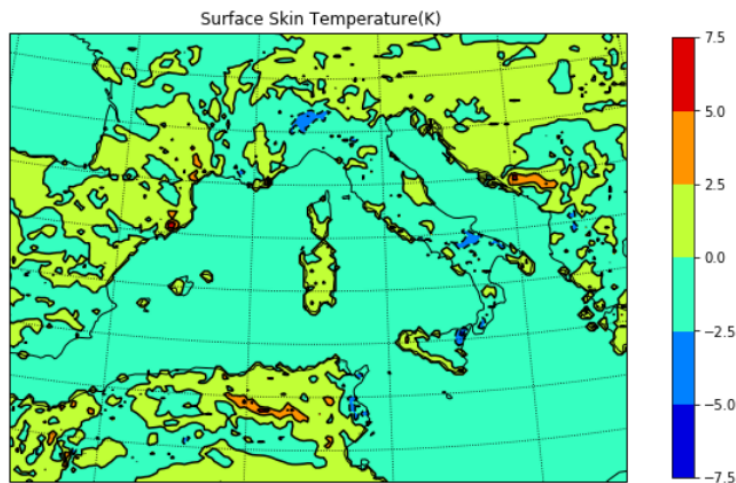


Figura 2.14: *Differenza tra i campi di temperatura superficiale senza e con assimilazione (update) dopo 6h di simulazione*

e senza assimilazione del campo di precipitazione totale. Nell'immagine le zone in rosso rappresentano un incremento importante della precipitazione fino a un massimo di 10 mm. L'effetto dell'assimilazione del campo di temperatura su tutta l'Italia ha un effetto importante sul campo di precipitazione in alcune zone del dominio, in particolare sulla zona degli alti Appennini e sulle Baleari

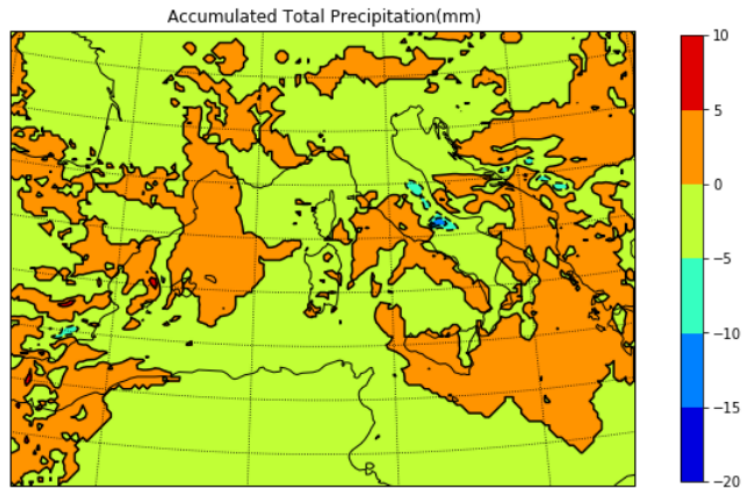


Figura 2.15: *Differenza tra i campi di precipitazione totale senza e con assimilazione (update) dopo 6h di simulazione*

2.6 Applicazione operativa

Nello schema 2.16 sono rappresentate le pipeline meteorologiche sviluppate per il progetto TDM. Solo la Catena Operativa di previsione meteo a scala limitata basata su BOLAM viene eseguita quotidianamente due volte al giorno. Mentre tutte le altre sono opzionali. Nella figura, sulla sinistra i dati di input necessari alle simulazioni, in rosso i modelli, cuore delle Catene meteorologiche, in blu gli output dei modelli.

Previsioni basate su BOLAM:

- Catena Operativa basata su BOLAM; della Catena Operativa basata su BOLAM abbiamo ampiamente discusso in 2.6. Come descritto nello schema 2.16 la catena necessita in input dell'analisi e delle condizioni al contorno fornite dal modello di circolazione globale GFS. In output produce la previsione ad una risoluzione di circa 0.075° di risoluzione. E' prodotta in circa 1 ora e 45 minuti ma può prodursi in 30 minuti
- Catena basata su BOLAM; supplisce alla mancanza dei dati 12 h dopo l'analisi. Questa catena opzionale, basata sulla stessa configurazione di BOLAM descritta in 2.6, ma con una maggiore risoluzione e la cui analisi e le cui condizioni al contorno sono l'output del modello BOLAM stesso relativo all'analisi di 12 ore prima, è stata testata allo scopo di supplire a un ritardo nella disponibilità dell'analisi GFS. Fornisce una previsione a 48 ore e ha tempi di esecuzione simili alla catena operativa
- Catena basata su MOLOCH Questa catena opzionale descritta in 2.6 con un modello in cui viene rilasciato il vincolo dell'idrostaticità necessita in input l'analisi e le condizioni al contorno fornite dalla previsione di BOLAM operativa e garantisce in output la previsione a 45 ore con una risoluzione di 0.0113 gradi, circa 1Km che rappresenta attualmente il limite della previsione meteo operative. I tempi di esecuzione sono elevati.

Previsioni basate su WRF

- Previsione WRF; la catena opzionale basata su WRF richiede anch'essa in input i dati del modello globale GFS, descritti precedentemente, e viene eseguita in una configurazione con passo di griglia di 0.075° (circa 7km di risoluzione orizzontale) e 50 livelli verticali. Fornisce

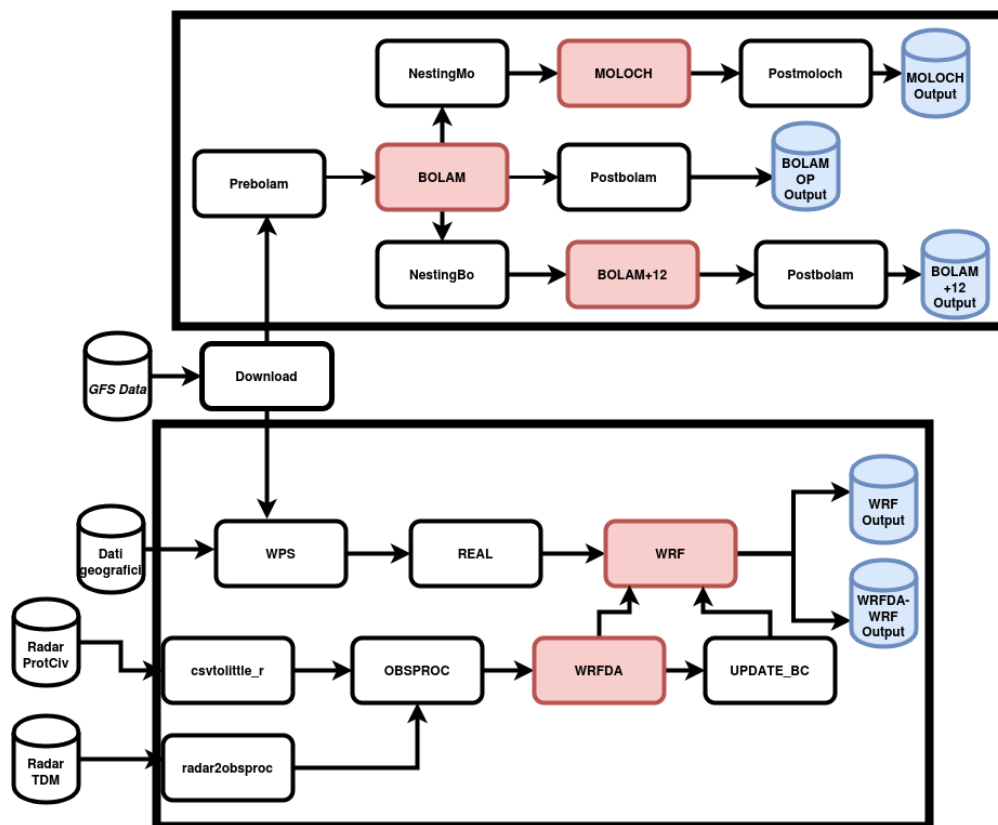


Figura 2.16: Schema della suite sviluppata. Vedi descrizione dettagliata nel testo.

in output una previsione a 48 ore. Benché il codice sia parallelo i tempi di calcolo sono decisamente superiori a quelli di BOLAM, questo è il motivo per cui non è stata scelta come Catena Operativa.

- Previsione WRF/WRFDA con assimilazione dati RADAR TDM; questa catena è basata su una previsione di WRF a più bassa risoluzione rispetto alla quella descritta nel punto precedente, ma contiene a valle l'assimilazione dei dati di precipitazione forniti dal Radar TDM. Vengono assimilati i dati dell'intensità di precipitazione cumulati delle prime 6 ore dopo l'analisi. I tempi di calcolo sono elevati
- Previsione WRF/WRFDA con assimilazione dati temperatura della Protezione Civile; questa catena è basata come la precedente su una previsione di WRF a più bassa risoluzione, ma contiene a valle l'assimilazione dei dati di temperatura forniti dalla rete dei radar e sensori della Protezione civile sull'Italia. Vengono assimilati i dati della temperatura relativi alle prime 6h dopo l'analisi. I tempi di calcolo sono elevati

2.7 Esempio di fruizione

Per verificare il sistema di previsione abbiamo scelto un fenomeno meteorologico rilevante che si è svolto negli ultimi mesi: abbiamo selezionato il 3 Dicembre del 2019. Dicembre 2019 esordisce con un afflusso verso il Mediterraneo occidentale di aria fredda proveniente dal Golfo di Biscaglia, tra le giornate del 2 e del 3, in contemporanea si ha l'instaurarsi di un campo di alta pressione

Atlantico su tutta l'Europa Centrale: dalla serata del 3 dicembre una struttura formatasi sul Mediterraneo sud-occidentale risale verso nord-est interessando con precipitazioni intense la regione Sardegna nella sua parte Orientale e l'area della città metropolitana di Cagliari. Il 3 Dicembre la Protezione Civile emette un bollettino di allerta moderata per tutta la Sardegna sud orientale. Il 4 dicembre poveranno 40 mm in 3 ore sulla zona di Uta, 30 mm in 3 ore su Decimomannu, 35 mm su Poggio dei Pini. Per questo evento sono state effettuate:

- Previsione Operativa BOLAM
- Previsione WRF/WRFDA con assimilazione dati temperatura nelle prime 6 ore dopo l'analisi
- Previsione Moloch ad altissima risoluzione

Nei paragrafi che seguono vengono descritti in estrema sintesi alcuni dei risultati forniti dalle previsioni prodotte per questo esempio di fruizione degli strumenti sviluppati

2.7.1 Previsione operativa con BOLAM

Qui vengono presentati alcuni estratti della previsione operativa Bolam per il 3 Dicembre 2019 prodotta con l'analisi delle 00. Nella immagine 2.17 presentiamo l'evoluzione della pressione al livello del suolo. Nella figura a sinistra, relativa alle 11 del giorno 3, possiamo vedere in basso a sinistra la formazione del minimo barico descritto nell'introduzione di questo paragrafo, mentre nella figura a destra, relativa alle 4 del giorno 4, è evidente lo spostamento verso nord-est del minimo barico che provocherà l'attività temporalesca della serata del giorno 4. La previsione BOLAM descrive con precisione l'evoluzione del fenomeno. Nella figura 2.18 la precipitazione

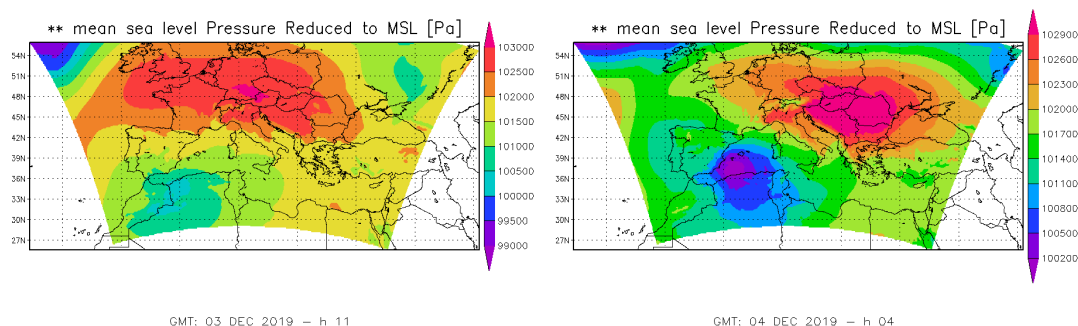


Figura 2.17: Evoluzione della pressione al suolo nella previsione operativa del 3 dicembre 2019

totale alle ore 20 e alle ore 21 del 4 Dicembre che conferma la bontà della previsione operativa che fornisce, in questo caso, una previsione efficace ed attendibile del regime di precipitazione del giorno 4 Dicembre. Nella figura 2.19 la precipitazione convettiva del giorno 4 alle ore 18 e alle ore 20. Interessante notare che l'immagine 2.18 a destra e la 2.19 a sinistra rappresentano lo stesso istante temporale e si può notare che la precipitazione presenta una componente sinottica che prevale su quella convettiva. Nella figura 2.20 l'evoluzione temporale della precipitazione, che evidenzia come il forecast abbia ben previsto gli eventi descritti.

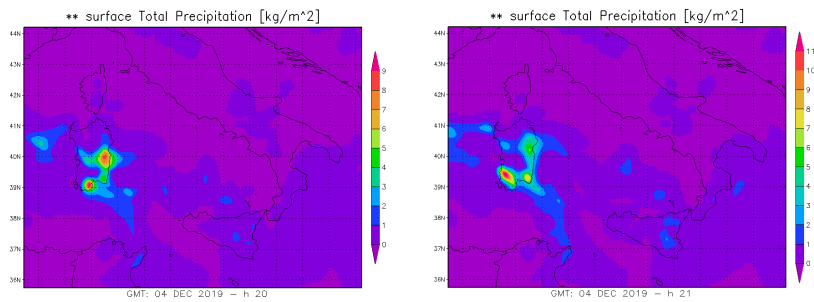


Figura 2.18: *Precipitazione totale negli istanti 44 e 45 della previsione operativa del 3 dicembre 2019*

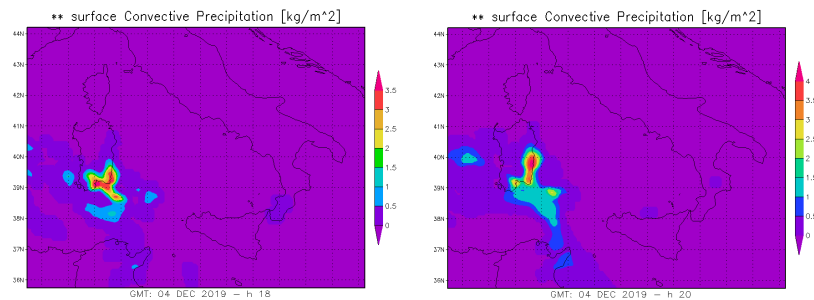


Figura 2.19: *Precipitazione convettiva negli istanti 42 e 44 della previsione operativa del 3 dicembre 2019*

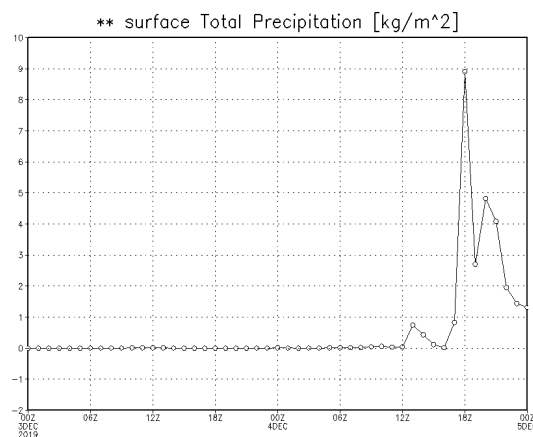


Figura 2.20: *Evoluzione dell'intensità di precipitazione nei giorni 3 e 4 Dicembre*

2.7.2 Previsione WRF con assimilazione della temperatura

Questa previsione effettuata con il modello WRF e con l'assimilazione delle misure al suolo della temperatura cattura, anche solo nel "first guess" l'evoluzione della struttura temporalesca che colpirà il sud-est della Sardegna come ben rappresentato dalla figura 2.21, in cui si può vedere la pressione al livello del suolo alla mezzanotte del 3 Dicembre. Nell'immagine 2.22 si può vedere la differenza tra le pressioni al suolo con e senza assimilazione, a destra le 6 della mattina del 3, a sinistra la mezzanotte del 3. Si può notare che a sinistra la differenza delle strutture bariche sia ben delineata, mentre sulla destra i contorni delle strutture sembrano essere più frastagliati. Questo

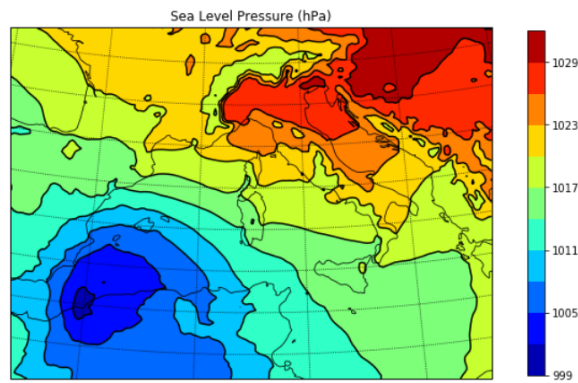


Figura 2.21: Pressione al livello del suolo della previsione "first guess" nell'istante 24

fenomeno può essere interpretato come la perdita di energia della perturbazione fornita dall'assimilazione man mano che il forecast procede. E' noto che l'effetto dell'assimilazione si attenua velocemente, dopo qualche ora, dalla conclusione della finestra di assimilazione. Nell'immagine

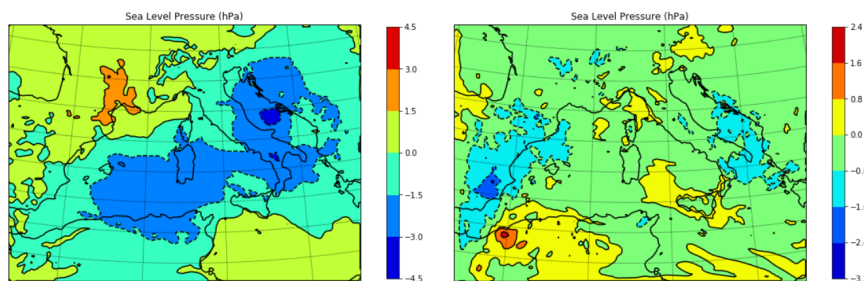


Figura 2.22: Differenza fra i campi di pressione al livello del suolo con e senza assimilazione agli istanti 6 e 24

2.23 la differenza fra i campi di precipitazione totale accumulata con e senza assimilazione alle 20 del giorno 4 Dicembre. Per quanto riguarda la regione Sardegna e l'area metropolitana di Cagliari non sembra esserci visivamente differenza fra il campo con assimilazione e quello senza. Rimangono delle differenze significative soprattutto nella zona delle Baleari, dove in effetti era in atto un intenso fenomeno di precipitazione. Probabilmente come per la pressione al livello del suolo, descritta precedentemente, anche il campo di precipitazione totale risente della distanza temporale dalla conclusione della finestra di assimilazione

2.7.3 Previsione MOLOCH

Infine in quest'ultimo paragrafo descriviamo alcune immagini relative alla previsione effettuata con il modello non-idrostatico. Come già descritto in precedenza il modello non idrostatico è molto impegnativo dal punto di vista computazionale sia per la griglia computazionale (1154 punti sulla latitudine e 1154 sulla longitudine e 60 livelli verticali) ma anche per la complessità connessa col rilascio del vincolo di idrostaticità. Per ottenere risultati in tempi accettabili per il nowcasting occorre la disponibilità di 750 processori. Anche in questo caso nella figura 2.24 è evidente in basso a sinistra il campo di bassa pressione che si avvicina alla Sardegna verso le 17 del 4 Dicembre. La figura 2.25 presenta invece la copertura nuvolosa totale. E' evidente una copertura totale di tutta la regione, preavviso dei fenomeni imminenti. Nella figura 2.26 la precipitazione totale alle 18 e

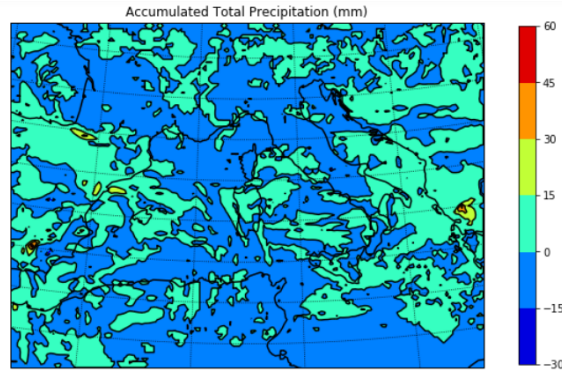


Figura 2.23: *Differenza fra i campi di precipitazione totale accumulata con e senza assimilazione all'istante 44*

alle 22 del giorno 4 Dicembre. Anche in questo caso la previsione è in accordo con i dati di precipitazione raccolti attraverso le misurazioni. È interessante che il modello idrostatico rappresenti meglio l'intensità di precipitazione rispetto a quello non idrostatico.

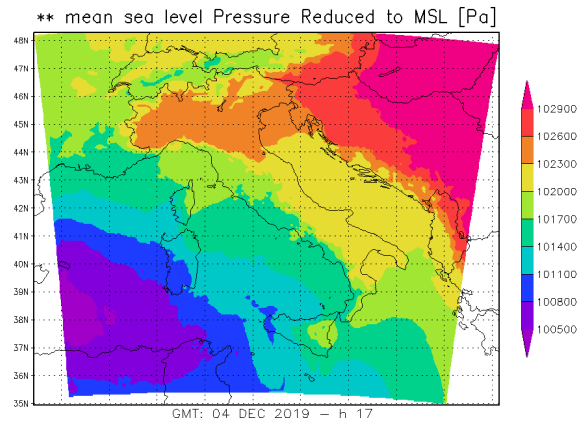


Figura 2.24: *Pressione al livello del suolo alle 17 del 4 Dicembre*

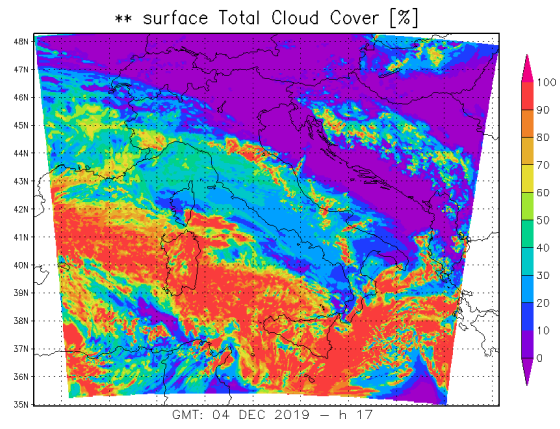


Figura 2.25: Copertura nuvolosa alle 17 del 4 Dicembre

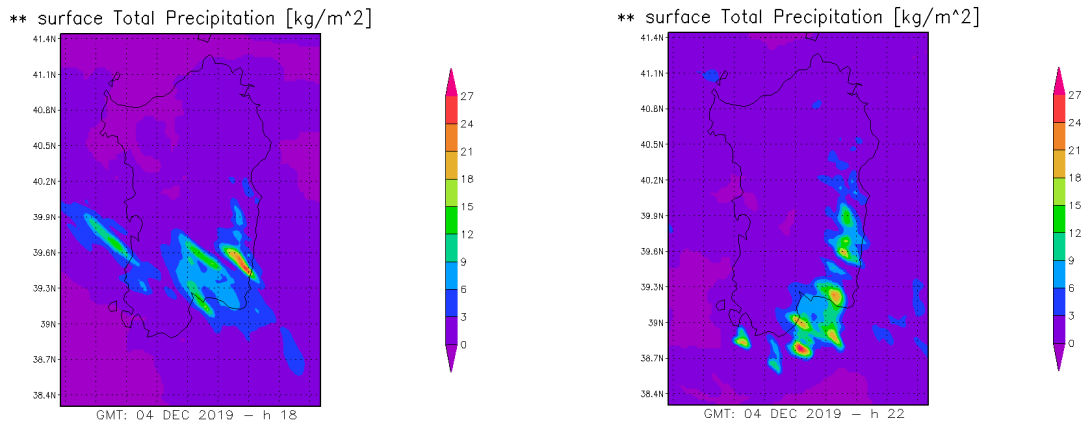


Figura 2.26: Precipitazione Totale all'istante 42 e 46 della previsione

3 Conclusioni

Il lavoro aveva come obiettivo principale la realizzazione di un dimostratore che, utilizzando come dati di ingresso quelli misurati dal radar assieme a quelli di pubblico dominio, consentisse di fornire prodotti, sotto forma di dati descrittivi e o predittivi, utilizzabili sia dal cittadino che dal decisore per aumentare la sicurezza del cittadino che abita nella città metropolitana di Cagliari.

In particolare, il lavoro di ricerca ha portato alla realizzazione di una catena operativa che mediante una suite di modelli che elaborano dati di input, sia raccolti nell'ambito del progetto stesso che di pubblico dominio, è allo stato attuale in grado di fornire:

- le previsioni del modello idrostatico BOLAM, aggiornate 2 volte su base giornaliera, utili per individuare l'approssimarsi di ondate di calore o gelo, e vento forte
- l'input per la previsione della produzione energetica da fonti rinnovabili ottenuta mediante post-processing delle previsioni numeriche dei modelli meteorologici di cui sopra
- a richiesta, le previsioni su un'area limitata alla sola Sardegna ad altissima risoluzione spaziale. Questo tipo di previsione, particolarmente onerosa dal punto di vista computazionale, viene prodotta nel caso siano previsti eventi di precipitazione giudicati potenzialmente pericolosi. Il trigger a questo tipo di previsione viene dato dall'analisi delle previsioni del modello BOLAM. Questa opzione consente di eseguire una simulazione di dettaglio utilizzando due modelli diversi il WRF ed il MOLOCH.

Bibliografia

- [1] A. Buzzi, M. Fantini, P. Malguzzi, and F. Nerozzi, “Validation of a limited area model in cases of mediterranean cyclogenesis: Surface fields and precipitation scores,” *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 53, no. 3, pp. 137–153, 1994.
- [2] [Online]. Available: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>
- [3] [Online]. Available: <http://www.isac.cnr.it/dinamica/bolam/index.html>
- [4] A. Arakawa and V. Lamb, “Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model,” *Methods in Computational Physics*, J. Chang, p. 174–267, 1977.
- [5] S. Billet and E. Toro, “On waf-type schemes for multidimensional hyperbolic conservation laws,” *J. Comput. Phys*, vol. 130, p. 1–24, 1997.
- [6] R. Lehehan, “On the choice of relaxation coefficients for davies’ lateral boundary scheme for regional weather prediction models,” *Meteorol. Atmos. Phys*, vol. 52, p. 1–14, 1993.
- [7] [Online]. Available: http://www.isac.cnr.it/dinamica/projects/forecasts/moloch_short_description_2012.htm
- [8] O. Drofa and P. Malguzzi, “Parameterization of microphysical processes in a non hydrostatic prediction model,” in *Proc. 14th Intern. Conf. on Clouds and Precipitation (ICCP)*, Bologna, 2004, p. 1297–3000.
- [9] [Online]. Available: https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/docs/grib2/grib2_doc/
- [10] B. Ritter and J. Geleyn, “A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations,” *Mon. Wea. Rev*, vol. 120, p. 303–325, 1992.
- [11] J.-J. Morcrette, “Radiation and cloud radiative properties in the ecmwf operational weather forecast model,” *J. Geophys. Res*, vol. 96D, p. 9121–9132, 1991.
- [12] J.-J. Morcrette, H. Barker, J. Cole, M. Iacono, and R. Pincus, “Impact of a new radiation package, mcrad, in the ecmwf integrated forecasting system,” *Mon. Wea. Rev*, vol. 136, p. 4773–4798, 2008.
- [13] J. Kain, “The kain-fritsch convective parametrization: an update,” *J. App. Meteorol*, vol. 43, p. 170–181, 2004.
- [14] W. Skamarock, J. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J. Powers, M. Duda, D. Barker, and X.-Y. Huang, “A description of the advanced research wrf version 4,” *NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR*, p. 145, 2019.
- [15] [Online]. Available: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>
- [16] [Online]. Available: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/wrf-phy.html>
- [17] [Online]. Available: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_references.htm
- [18] [Online]. Available: <http://data.tdm-project.it/dataset>

- [19] X. Zhang, X.-Y. Huang, J. Liu, J. Poterjoy, Y. Weng, F. Zhang, and H. Wang, "Development of an efficient regional four-dimensional variational data assimilation system for wrf," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 31, p. 2777, 2014.
- [20] X.-Y. Huang, Q. Xiao, D. M. Barker, X. Zhang, J. Michalakes, W. Huang, T. Henderson, J. Bray, Y. Chen, Z. Ma, J. Dudhia, Y. Guo, X. Zhang, D.-J. Won, H.-C. Lin, and Y.-H. Kuo, "Four-dimensional variational data assimilation for wrf: Formulation and preliminary results," *Mon. Wea. Rev.*, vol. 137, p. 299 314, 2009.
- [21] [Online]. Available: <https://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/ylin/pcpanl/stage4/>
- [22] [Online]. Available: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/>
- [23] [Online]. Available: <http://www.protezionecivile.gov.it/attivita-rischi/meteo-idro/attivita/p-revisione-prevenzione/centro-funzionale-centrale-rischio-meteo-idrogeologico/monitoraggio-sorveglianza/mappa-radar>
- [24] [Online]. Available: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/OnlineTutorial/Help/little.html>