Politecnico di Torino
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

Tecniche di nowcasting mediante radar meteo di fenomeni intensi di precipitazione

Relatore:
Pierluigi Claps

Correlatori:
Renzo Bechini
Roberto Cremonini

Candidato:
Antonio Giulio Coretti

Luglio 2021

Indice

1 Introduzione **9**
1.1 La previsione 10
1.2 La meteorologia che prevede 12
1.3 L'evoluzione della previsione meteorologica 13
1.3.1 Dagli albori alle carte meteorologiche 14
1.3.2 Dal metodo isobarico alla Scuola Norvegese 16
1.3.3 I modelli atmosferici 19
1.3.4 La previsione numerica 23
1.3.5 I metodi di nowcasting 28
1.4 Le osservazioni meteorologiche 29
1.4.1 Le stazioni meteorologiche 30
1.4.2 Le navi meteorologiche 31
1.4.3 Le boe meteorologiche 31
1.4.4 Gli aerei del programma AMDAR 31
1.4.5 Le radiosonde 32
1.4.6 I satelliti meteorologici 32
1.4.7 Il radar meteorologico 33
1.5 Classificazione delle previsioni 34
1.5.1 L'orizzonte temporale 34
1.5.2 La scala spaziale 38
1.6 Articolazione dello studio 39

2 La predicibilità **41**
2.1 Introduzione al capitolo 41
2.2 Sistemi deterministici e sistemi stocastici 41
2.3 Predicibilità nei sistemi deterministici 42
2.3.1 L'esempio dell'atmosfera 43
2.3.2 Un modello matematico per la predicibilità 45
2.3.2.1 L'esponente di Lyapunov 46
2.3.2.2 Il tempo di Lyapunov 47

2.3.2.3 Dipendenza dal margine d'incertezza . . . 47
2.3.2.4 L'esponente di Lyapunov a scala finita . . . 48
2.3.3 La predicibilità nei sistemi accoppiati 49
2.3.4 L'influenza della scala temporale 51
2.3.5 Gli approcci alla predicibilità 52

3 I metodi di estrapolazione 55
3.1 Introduzione al capitolo 55
3.2 Estrapolazione e modelli numerici 56
3.3 La Persistenza Euleriana 57
3.3.1 La relazione della persistenza Euleriana 58
3.3.2 L'equazione differenziale 59
3.3.3 Predicibilità della persistenza Euleriana 61
3.4 La Persistenza Lagrangiana 62
3.4.1 La relazione della persistenza Lagrangiana 63
3.4.2 L'equazione differenziale 64
3.4.3 La discretizzazione dell'equazione differenziale 66
3.4.4 Il calcolo del campo di moto 66
3.4.5 L'avvezione dell'eco radar 67
3.4.5.1 Schema a vettori costanti 70
3.4.5.2 Schema semi-Lagrangiano 70
3.4.5.3 Filosofia forward e backward 74
3.4.5.4 Diffusione numerica 77
3.4.6 Predicibilità della persistenza Lagrangiana 79
3.5 Limiti dei metodi di persistenza 79
3.5.1 Le fonti d'incertezza 80
3.5.2 Persistenza contro evoluzione 82
3.5.3 I processi di Growth & Decay 83
3.6 Modifiche alla persistenza Lagrangiana 85
3.6.1 L'inserimento di processi di G&D 85
3.6.2 La trasformazione delle osservazioni 89

4 Il calcolo del campo di avvezione 91
4.1 Introduzione al capitolo 91
4.2 La tecnica del flusso ottico 92
4.2.1 Dalla psicologia al processamento d'immagini 92
4.2.2 Il problema del flusso ottico 93
4.2.3 Il problema dell'apertura 96
4.2.4 L'aggiunta di OFC 100
4.3 La tecnica dell'area tracking 102

4.3.1 Il campo di moto uniforme 103
4.3.2 L'algoritmo TREC 103
4.3.3 L'algoritmo COTREC 104
4.3.4 L'algoritmo VET 105
4.4 La tecnica del cell tracking 109

5 Il metodo degli analoghi 111
5.1 Introduzione al capitolo 111
5.2 La precipitazione orografica 112
5.2.1 Caratteristiche 112
5.2.2 La previsione della pioggia orografica 114
5.3 Un metodo basato sull'analogia 117
5.3.1 Caratteristiche e limitazioni 118
5.3.2 L'evoluzione del metodo 119
5.3.3 L'esempio del sistema NORA 120

6 NACO – I dati radar 123
6.1 Introduzione al capitolo 123
6.2 Il radar meteorologico 124
6.2.1 Evoluzione del radar meteorologico 124
6.2.2 Il principio di funzionamento 125
6.2.3 La potenza retrodiffusa 127
6.2.4 La riflettività 127
6.2.5 La relazione Z-R 128
6.2.6 La riflettività logaritmica 130
6.2.7 La riflettività differenziale 131
6.2.8 Fonti d'errore 132
6.3 I radar gestiti da ARPA Piemonte 136
6.3.1 Il radar di Bric della Croce 136
6.3.2 Il radar di Monte Settepani 139
6.3.3 Elaborazioni condotte dall'ARPA 139
6.3.4 La maschera di visibilità 141
6.4 Gli eventi a disposizione 143
6.4.1 I primi 19 eventi 144
6.4.2 Gli eventi dal 20 al 38 148
6.4.3 Gli eventi dal 39 all'81 148
6.4.4 La classificazione degli eventi 154
6.5 La scelta della regione 156
6.5.1 L'upscaling degli eventi 159
6.5.2 I criteri della scelta 161

6.5.3 La prima regione scelta 162
6.5.4 La seconda regione scelta 164
6.5.5 La terza regione scelta 165

7 NACO – Il metodo 169
7.1 Introduzione al capitolo 169
7.2 Le tre fasi del metodo 169
7.3 Fase 1 – La scelta della query 170
7.3.1 I vincoli della scelta 170
7.3.2 Le limitazioni sull'archivio 171
7.4 Fase 2 – La ricerca degli analoghi 172
7.4.1 I requisiti 172
7.4.2 Le soluzioni in letteratura 172
7.4.3 La procedura del NACO 174
7.4.4 La somiglianza di distribuzione spaziale in NACO . 177
7.4.4.1 Il criterio dell'area bagnata 177
7.4.4.2 Il criterio per aree 178
7.4.4.3 Il criterio per pixel 181
7.4.5 La somiglianza di evoluzione temporale in NACO . . 183
7.4.5.1 Il criterio del campo di moto 183
7.5 Fase 3 – Il confezionamento della previsione 185

8 NACO – Le analisi 189
8.1 Introduzione al capitolo 189
8.2 Il caso studio 189
8.2.1 La scelta della regione 189
8.2.2 La scelta della query 190
8.2.3 La costruzione dell'archivio 191
8.3 L'applicazione del metodo NACO 191
8.3.1 L'ottenimento degli analoghi 191
8.3.2 L'apporto di Pysteps 193
8.4 La previsione deterministica 194
8.4.1 Il primo analogo 195
8.4.1.1 La linea di ricerca per aree 195
8.4.1.2 La linea di ricerca per pixel 200
8.4.2 L'ensemble mean 202
8.5 La previsione probabilistica 204
8.6 Il confronto con i metodi di estrapolazione 210
8.6.1 La persistenza Euleriana 210
8.6.2 La persistenza Lagrangiana 212

9 Conclusioni **215**

Elenco delle figure **219**

Elenco delle tabelle **223**

Bibliografia **225**

Posso prevedere il moto dei corpi celesti,
ma posso dire poco su quello di una
piccola goccia d'acqua.

Galileo Galilei

Capitolo 1

Introduzione

Nel campo delle previsioni meteorologiche a brevissimo termine, indicate in una parola con il vocabolo inglese *nowcasting*, l'utilizzo dei modelli numerici di previsione risulta inadeguato. Infatti, i lunghi tempi di elaborazione della previsione e la bassa risoluzione spaziale e temporale dei modelli previsionali di tipo numerico non si addicono alle esigenze di una previsione con associato un anticipo di non oltre 6 ore. Per tale motivo si sono sviluppati, nel corso degli anni, alcuni metodi di nowcasting basati sull'estrapolazione di una previsione a partire da echi radar. Tali metodi, fondati sulla *persistenza Euleriana* oppure *Lagrangiana*, forniscono generalmente previsioni migliori rispetto a quelle generate dai modelli numerici, almeno nelle prime due ore di previsione. Tuttavia, se la precipitazione coinvolge aree a orografia complessa, l'errore generato dai metodi estrapolativi aumenta. La motivazione risiede nella nascita di una componente ulteriore di pioggia dovuta al sollevamento orografico delle masse d'aria. Chiamata *pioggia orografica*, quest'intensificazione della precipitazione sottostà a meccanismi prettamente orografici, rendendosi sfuggente ai tentativi di previsione per estrapolazione. Per tale motivo, un metodo fondato sull'analogia con eventi piovosi del passato e basato su osservazioni da radar meteorologico è venuto recentemente in aiuto al nowcasting su orografia complessa.

In questo lavoro di tesi, dopo aver introdotto la previsione meteorologica a brevissimo termine e le tecniche per confezionarla, si sviluppa una nuova procedura di previsione per analoghi e si confrontano i risultati della sua applicazione con quelli derivanti dai metodi estrapolativi.

1.1 La previsione

Per migliaia di anni la *previsione*, qualunque fosse l'oggetto di essa, ha affascinato e continua ad affascinare persone e popoli. A volte considerata un segno dell'ispirazione divina, altre volte vista come un'attività stravagante dalla quale prendere le distanze, la *previsione* è da sempre stata motivo di dibattito a causa della sua intrinseca natura esoterica. Attorno al 700 a.C. il profeta Isaia scrisse:

> Annunziateci quel che succederà nel futuro, e sapremo che siete degli dèi. (Isaia 41:23)

Un centinaio di anni più tardi, nell'antica Babilonia, gli indovini predicevano il futuro basandosi sulla disposizione dei vermi all'interno del fegato delle pecore imputridite. Qualche secolo dopo, attorno al 300 a.C., coloro che desideravano chiaroveggenze sul futuro si recavano a Delfi, in Grecia, per consultare l'Oracolo, un individuo che, sotto l'effetto dei vapori di etilene, avrebbe fornito le sue previsioni.

Qualche secolo più tardi, in epoca romana, un decreto del 357 d.C. voluto dall'imperatore Costantino vietava a chiunque di consultare un indovino, un matematico o un chiaroveggente, affinché la curiosità di conoscere il futuro potesse essere messa a tacere per sempre. Similmente accadde più di un millennio più tardi, in Inghilterra. Era il 1736, quando divenne reato chiedere denaro in cambio di previsioni del futuro, pena tre mesi di reclusione e lavori forzati [52].

La fortuna di una *previsione* può assumere due possibili volti, perfettamente antitetici, come due facce di una stessa medaglia. Infatti se la previsione si rivela giusta, assume immediatamente connotati al limite del sovrannaturale, e il *previsore* ottiene la gloria, mentre se la previsione si rivela sbagliata, si ottiene l'effetto contrario, e il *previsore* perde gran parte della sua credibilità. É questo il caso di Ken Olsen, presidente e fondatore dell'azienda statunitense DEC (Digital Equipment Corporation), il quale nel 1977 affidò alla sua voce la seguente previsione:

> Non c'è nessun motivo per cui qualcuno debba volere un computer nella propria casa. (Ken Olsen, 1977)

Al giorno d'oggi questa frase sembra folle – e in effetti tre anni più tardi la IBM produsse il primo personal computer –, e tuttavia contestualmente alla sua pronuncia molti uomini devono essere stati d'accordo con Olsen,

specialmente coloro che lavoravano con gli enormi mainframe prodotti dalla DEC [1].

É vero che nel tempo si sono avvicendati tanti altri casi di previsioni sventurate – come la previsione del 1960 che pronosticava una crescita della popolazione mondiale tendente a infinito nel 2026[2], oppure come quella del 1946 che prevedeva una rapida perdita d'interesse verso la televisione[3] – ma neppure sono mancati i casi di previsioni fortunate. Ad esempio la previsione dell'esistenza di Nettuno, osservato per la prima volta nel 1846 ma previsto già alcuni decenni prima[4], oppure la previsione dell'esistenza del *bosone di Higgs*, predetto nel 1964 da Peter Higgs [49] e osservato solamente nel 2012 grazie all'LHC (Large Hadron Collider), l'acceleratore di particelle del CERN di Ginevra.

Ci sono, inoltre, alcune previsioni di più recente nascita che non possono inquadrarsi in nessuna delle due categorie sopra citate, perché ancora attendono di essere confermate o smentite. Tra queste campeggia, minacciosa come una spada di Damocle, la previsione del cosmologo Stephen Hawking [120], che nel 2017 ha concesso all'umanità solamente cent'anni ancora prima che la Terra diventi invivibile, e si renda necessario un trasferimento s'un altro pianeta per preservare la specie[5].

[1]Con ogni probabilità Olsen lo disse per focalizzare le menti dei suoi impiegati sui mainframe giganteschi che dovevano produrre piuttosto che sulle fantasiose idee circolanti di piccoli computer personali, ma la storia fece il resto e, decontestualizzando la frase di Olsen, ne ha determinato la malasorte.

[2]Era il 1960 quando la rivista *Science* pubblicò un articolo dello scienziato e filosofo Heinz von Foerster nel quale, dopo aver individuato una formula per approssimare al meglio l'andamento della popolazione mondiale nel corso degli anni, si pronosticava una crescita più che esponenziale che avrebbe portato a un numero infinito di persone nel Novembre del 2026 [112]. Questa previsione, nota come la *Doomsday Equation*, si basava sul fatto che, stando alla formula trovata, il tempo di raddoppio della popolazione mondiale, che diminuiva in continuazione visto l'andamento più che esponenziale, sarebbe diventato nullo proprio nel Novembre del 2026, con lo scenario di una popolazione infinita. L'obiezione principale che fu fatta per smontare questa previsione concerne il tempo finito e costante di gestazione per l'essere umano, pari a nove mesi, oltre che la consapevolezza che i sistemi biologici raramente mantengono una crescita esponenziale per molto tempo.

[3]Era il 1946 e la televisione era nata da poco quando il produttore cinematografico Darryl Zanuck disse: "La televisione non durerà a lungo perché le persone presto si stancheranno di fissare una scatola in compensato ogni sera".

[4]Nettuno fu osservato la sera del 23 settembre 1846 da Johann Gottfried Galle con il telescopio dell'Osservatorio astronomico di Berlino, ma la sua esistenza era già stata predetta nel 1821 dall'astronomo francese Alexis Bouvard sulla base di insolite perturbazioni dell'orbita di Urano [18], spiegabili solamente teorizzando la presenza di un ulteriore pianeta sconosciuto più esterno.

[5]Dopo aver più volte asserito la necessità dell'uomo di colonizzare un altro pianeta, nel 2017 Stephen Hawking ha fornito i tempi entro cui farlo, 100 anni. É questo il

In conclusione, confezionare una previsione non è mai un compito banale, perché dall'esito di quella previsione scaturirà la sorte e la credibilità del confezionatore di previsioni. Perciò fornire una previsione richiede una certa audacia e una certa fiducia nei propri mezzi oltre che negli elementi alla base della previsione. Di certo esistono previsioni più ardite – e tipicamente sono quelle a più lungo termine, con maggiore probabilità di insuccesso – e previsioni meno ardite – che di solito sono a più breve gittata temporale, e si basano su estrapolazioni di dati statistici –, ma in ogni caso l'attività di prevedere quello che accadrà nel futuro non è mai semplice, e le aziende che sapranno fare proiezioni migliori saranno avvantaggiate rispetto alle altre.

Questo lavoro di tesi si occuperà di un particolare tipo di previsione, quella finalizzata ad anticipare le condizioni meteo future: la *previsione meteorologica*. In particolare, si andranno ad analizzare e approfondire alcuni specifici aspetti della previsione meteorologica *a brevissimo termine*, addetta a fornire previsioni fino alle 6 ore di anticipo.

1.2 La meteorologia che prevede

Uno dei campi scientifici nei quali è maggiormente richiesto effettuare previsioni è rappresentato dalla Meteorologia. Come suggerisce l'etimologia della parola[6], le Meteorologia è il ramo delle scienze dell'atmosfera che studia le *meteore*, termine con il quale si fa riferimento a qualsiasi fenomeno abbia luogo nell'atmosfera terrestre. A seconda della natura della meteora, si parla distintamente di:

1. **Idrometeore**, sono le meteore acquose, tra cui pioggia, neve e grandine, ma anche brina, gelata, rugiada, nebbia e guazza;

2. **Litometeore**, sono le meteore che contengono polveri di minerali, come caligine e tempeste di sabbia e polveri;

tempo trascorso il quale la Terra sarebbe con ogni probabilità ormai inospitale per la specie umana. Dietro questa previsione c'è la convinzione del cosmologo che la vita sul nostro pianeta stia diventando sempre più precaria a causa dei cambiamenti climatici, delle possibili epidemie e della crescita continua della popolazione, senza tralasciare i potenziali impatti con asteroidi.

[6]Il termine Meteorologia ha derivazione greca, e unisce il sostantivo plurale *μετέωρα* [metéora], ovvero "le cose che sono in alto", intendendo in cielo, al sostantivo *λόγος* [lògos], "discorso", per cui il termine indica la scienza che discute dei fenomeni atmosferici.

3. **Elettrometeore**, sono le meteore che presentano fenomeni elettrici, ovvero fulmini, tuoni e aurore polari;

4. **Fotometeore**, sono le meteore che si manifestano con fenomeni ottici, come arcobaleno, alone e gloria;

5. **Meteore eoliche**, sono le meteore ventose, come tromba d'aria, tornado e ciclone tropicale oltre ai classici venti;

Tra gli scopi fondamentali della Meteorologia, oltre allo *studio* della struttura dell'atmosfera e dei fenomeni che si scatenano al suo interno, c'è la *previsione* di questi ultimi. Non solo studiarli, ma studiarli per poi saperli prevedere. Perché più in profondità li si analizza e li si conosce, più attendibili ne risulteranno i pronostici.

La *previsione meteorologica* ricopre un ruolo fondamentale nella società moderna, perché se è vero che allo stato attuale delle conoscenze le previsioni meteorologiche possiedono ancora un certo grado d'incertezza, è pur vero che la loro utilità è grandissima e indiscutibile in vari settori, specialmente in quello dei trasporti (principalmente aerei) e in quello dell'agricoltura, oltre a svolgere un ruolo fondamentale nel prevenire le alluvioni urbane.

Nella sezione che segue verrà delineata brevemente l'evoluzione storica dei metodi di previsione meteorologica, per poi descrivere rapidamente gli strumenti e gli apparati a disposizione del mondo contemporaneo per condurre osservazioni meteorologiche, e infine classificare le previsioni in base all'orizzonte spaziale fino a cui si spingono e alla scala spaziale che coinvolgono.

1.3 L'evoluzione della previsione meteorologica

La necessità di conoscere lo stato atmosferico futuro e tutti i fenomeni che possono avere influenza sulle attività umane è sorta spontanea nell'uomo fin dai primordi della sua esistenza. In questa sezione verrà brevemente delineata l'evoluzione dei metodi di previsione del tempo nel corso dei secoli, sino ai giorni nostri.

Per lo sviluppo di questa sezione si è diffusamente fatto riferimento al capitolo *L'analisi e la previsione del tempo* appartenente al libro *L'atmosfera e il clima* (Mario Pinna, 1978, rif. [88]), e al libro *L'universo meteorologico. Uno scienziato tra le nuvole* (José Miguel Viñas, 2016, rif. [111]).

1.3.1 Dagli albori alle carte meteorologiche

La meteorognostica

I primi metodi di previsione del tempo, attestati già all'epoca dei Babilonesi (VII secolo a.C.), avevano un carattere puramente empirico: dall'analisi delle caratteristiche del cielo e della sua copertura nuvolosa si riuscivano ad anticipare di qualche ora certe condizioni meteorologiche. Questo semplice ma efficace modo di fornire piccole previsioni, basato sul riconoscimento di un certo pattern nel cielo e fondato sul bagaglio osservativo accumulato di generazione in generazione, è arrivato sino ai nostri tempi producendo la cosiddetta *meteorognostica*, ovvero la tradizione popolare della meteorologia. E per facilitare la trasmissione delle *regole meteorognostiche* accumulate nel corso dei decenni, la rima è venuta in aiuto, e ha permesso il cistallizzarsi delle conoscenze nella tradizione dei proverbi. Perciò detti come *Rosso di sera, bel tempo si spera*, *Cielo a pecorelle, acqua a catinelle* oppure *Marzo pazzarello, guarda il sole e prendi l'ombrello* contengono esempi di previsioni empiriche (giornaliere nei primi due casi, mensili nell'ultimo) basate sulla fiducia nell'analogia osservativa[7].

Altre osservazioni meteorognostiche non sono invece contenute nel bagaglio proverbiale, come il fatto che la nebbia del mattino preannunci buone condizioni meteorologiche (poiché le condizioni piovose sono precedute da vento o da nuvole che impediscono la formazione di nebbia), oppure che l'ispessimento della copertura nuvolosa sia indicativo dell'approssimarsi di un fronte meteorologico con possibile pioggia nell'immediato futuro.

Sta di fatto che non sempre queste previsioni empiriche si rivelavano attendibili, e finché non si ebbero a disposizione strumenti di misurazione delle variabili atmosferiche, la previsione meteorologica rimase aggrappata alle deboli deduzioni basate sulla ripetibilità dei pattern atmosferici.

Il barometro

Per ottenere le prime analisi di carattere puramente scientifico e le prime misure sistematiche dei dati di osservazione (oltre che le prime avvisa-

[7] Questo semplice metodo di previsione, fondato sul riconoscimento visivo di un certo pattern meteorologico e sul conseguente confezionamento di una previsione basata sull'intuitivo principio *a pattern analoghi seguono condizioni meteorologiche analoghe*, rappresenta la versione primordiale del metodo di previsione a brevissimo termine che nel seguito verrà indicato come *metodo degli analoghi*, e che rappresenta il metodo principe indagato in questo studio di tesi (per estrema curiosità si veda il capitolo intitolato *Il metodo degli analoghi*, ma si consiglia di proseguire con ordine).

glie di collaborazione meteorologica tra i vari paesi) si deve attendere il XVII secolo e il mecenatismo della casata de' Medici. Infatti, grazie al forte interesse del Granduca di Toscana Ferdinando II de' Medici (1610–1670) nei confronti della scienza e della sperimentazione, nel 1643 nacque il *barometro*[8] dall'inventiva del matematico e fisico Evangelista Torricelli (1608–1647), beneficiario del munifico mecenatismo del Granduca. Qualche anno dopo, nel 1657, venne inaugurata a Firenze l'*Accademia del Cimento*, la prima società scientifica europea di carattere sperimentale, che inviò diversi esemplari del nuovo strumento a noti scienziati francesi, inglesi e olandesi con il fine di promuoverne l'uso per il bene della scienza meteorologica. Nel frattempo, sotto la spinta del Granduca Ferdinando II stava sorgendo la prima rete europea di stazioni meteorologiche, una decina in totale, distribuite prevalentemente sul territorio nazionale. Malgrado queste stazioni disponessero di strumentazioni piuttosto rudimentali, furono condotte con discreti risultati misurazioni sistematiche di pressione, temperatura, umidità e vento.

Le carte sinottiche

Si deve però attendere il 1780 per l'introduzione delle *carte meteorologiche*. Fu il chimico francese Antoine-Laurent de Lavoisier (1743–1794), più conosciuto semplicemente come Lavoisier, ad avere l'idea di tracciare su carte geografiche globali le misure giornaliere di alcune grandezze meteorologiche acquisite in contemporanea su una vasta rete di osservatori internazionali. Ma dall'idea di Lavoisier passarono quarant'anni, e solo nel 1820 si ottenne la prima *carta meteorologica sinottica*[9] grazie al lavoro del fisico tedesco Heinrich Wilhelm Brandes (1777–1834), che perciò viene considerato il fondatore della *Meteorologia Sinottica* (branca della Meteorologia che avrà il suo maggiore sviluppo con i concetti della Scuola Norvegese, come dettagliato nel paragrafo successivo). Presto si comprese che, attraverso l'elaborazione e l'interpretazione delle configurazioni meteorologiche

[8] Il *barometro* è lo strumento meteorologico impiegato per la misurazione della pressione atmosferica. Oltre al classico *barometro a mercurio* inventato da Torricelli, la versione di barometro più utilizzata ai giorni nostri prende il nome di *barometro aneroide*. Quest'ultimo misura la pressione esterna sulla base delle deformazioni cui è sottoposta una capsula di metallo al suo interno, dentro la quale è stato praticato il vuoto. A causa della presenza della capsula metallica, viene anche chiamato *barometro metallico*.

[9] La parola *sinottica* deriva dal greco, unione di *συν* [syn], "con", e di *οπτικὸς* [optikòs], "vista", dando vita a una parola che significa "veduta d'insieme". La sinottica, infatti, è quella branca della meteorologia che si occupa dell'analisi contemporanea di tutte le osservazioni realizzate s'una vasta area geografica [44].

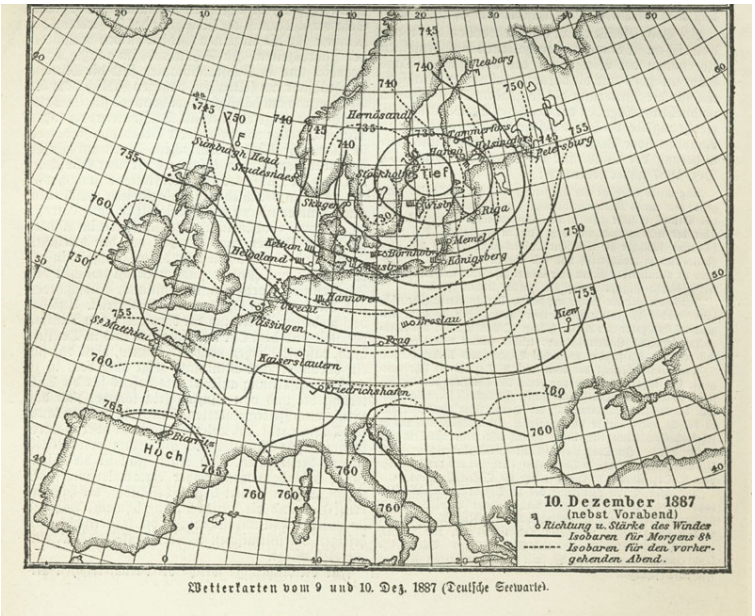


FIGURA 1.1: **Carta sinottica con sole isobare.** Le curve disegnate rappresentano le isobare, con linea continua quelle relative alle 8:00 di mattina del giorno considerato e con linea tratteggiata quelle relative alla sera precedente. Si può notare una zona di bassa pressione (detta *ciclone*) sulla penisola scandinava che si sta muovendo verso la Finlandia. Inoltre si notano indicazioni simboliche su forza e direzione del vento.

tracciate sulle carte sinottiche (come cicloni, uragani, ecc.), sarebbe stato possibile seguire queste configurazioni ed eventualmente prevederne lo sviluppo. Per far ciò si rendeva però necessario un rapido sistema di comunicazione per l'accentramento dei dati meteorologici internazionali (in FIGURA 1.1 un esempio di carta sinottica risalente al 1887).

1.3.2 Dal metodo isobarico alla Scuola Norvegese

L'uso del telegrafo

La svolta avvenne nel 1854 durante la Guerra di Crimea, che vide i russi scontrarsi con inglesi e francesi. Durante la battaglia, un violentissimo temporale si abbatté sul Mar Nero, distruggendo quasi del tutto la flotta anglo-francese. A seguito dell'evento catastrofico, Napoleone III, allora imperatore di Francia, incaricò l'astronomo Urbain Le Verrier (1811–1877) di studiare l'accaduto, per comprendere se quel disastroso evento meteorologico avrebbe potuto essere previsto. Così Le Verrier iniziò a raccogliere dati meteorologici dagli osservatori europei, e dalla loro analisi dedusse che un

sistema depressionario molto profondo si era andato spostando per diversi paesi d'Europa, prima di giungere alle flotte anglo-francesi e dare luogo al disastro. Perciò concluse che, conoscendo questi dati con sufficiente anticipo, si sarebbe potuto prevedere l'arrivo del temporale, evitando la disfatta. Ma perchè le truppe stanziate nel Mar Nero potessero essere avvertite in tempo, sarebbe comunque servito un sistema rapido di comunicazione.

Fu così che Le Verrier propose l'uso del *telegrafo* per lo scambio di comunicazioni e bollettini meteorologici. Allora, con questa finalità, furono istituiti prima in Francia e poi in diversi paesi i Servizi Meteorologici, stazioni collegate tramite telegrafo.

Il metodo isobarico

Tuttavia inizialmente i risultati che si ottennero non furono molto brillanti, e ciò fu dovuto soprattutto al fatto che, con la convinzione che il tempo dipendesse unicamente dalla distribuzione di pressione atmosferica[10] (si era infatti capito che una diminuzione della pressione prelude al peggioramento delle condizioni meteorologiche, mentre un aumento porta al miglioramento delle medesime), le analisi erano condotte su carte sinottiche recanti esclusivamente le misure di pressione, graficate per mezzo di linee isobare (motivo per cui si usa indicare come *metodo isobarico*). Altra causa d'errore derivava dall'assenza quasi totale di misurazioni negli strati superiori della troposfera e nella stratosfera, eccetto alcune misurazioni in alta montagna e alcune sporadiche ascensioni aerostatiche.

La Scuola Norvegese

Tuttavia, malgrado i suoi difetti, il *metodo isobarico* mantenne lo status di metodo ufficiale di previsione fino agli anni della Grande Guerra. Fu verso la fine del conflitto che, ad opera della cosiddetta "Scuola Norvegese", équipe di illustri meteorologi norvegesi e di altri paesi nordici, vennero introdotte nuove teorie meteorologiche che ben presto si diffusero in tutti i paesi. Queste teorie, nate dall'analisi attenta dei dati provenienti dalle stazioni scandinave, introdussero ad esempio i concetti di *fronte* e di

[10] Convinzione solo parzialmente fondata, perché con le conoscenze attuali si sa che lo stato atmosferico è in realtà il risultato di un gran numero di fattori tra loro interconnessi, per cui è impossibile interpretarlo e prevederne l'evoluzione tenendo conto solamente di uno solo di essi, per quanto importante.

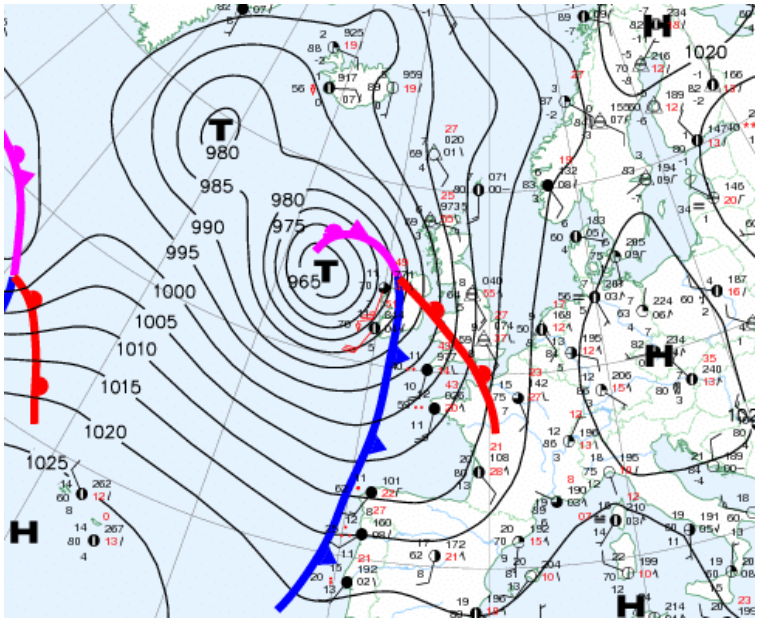


FIGURA 1.2: **Carta sinottica con isobare e fronti.** Come nella FIGURA 1.1, le curve disegnate rappresentano le isobare, che individuano una zona di bassa pressione al largo del Regno Unito. In più sono tracciate le linee dei fronti: quella rossa, contrassegnata da semicerchi, individua un *fronte caldo*; quella blu, contrassegnata da triangoli, individua un *fronte freddo*; e infine quella color amaranto, contrassegnata sia da semicerchi che da triangoli disposti alternativamente – segno di un tipo di fronte che presenta tanto caratteristiche del fronte caldo quanto caratteristiche del fronte freddo –, individua un *fronte occluso*.

massa d'aria[11], concetti che vengono usati ancora oggi nella Meteorologia moderna.

Questi nuovi concetti norvegesi gettarono le basi per la cosiddetta *Meteorologia Sinottica*, quella branca della Meteorologia che studia i fenomeni atmosferici nello spazio e nel tempo con il fine ultimo della previsione. L'oggetto di studio della Meteorologia Sinottica sono le carte meteorologiche sinottiche, che oltre a presentare le sole isobare (come avveniva ai tempi

[11]Per *massa d'aria* – in inglese *air mass* – si fa riferimento a un volume atmosferico di grandi dimensioni (anche diversi milioni di chilometri quadrati e altezza di diversi chilometri) caratterizzato da condizioni di temperatura e umidità abbastanza uniformi. Quando due masse d'aria sono a contatto, la superficie che le separa è detta *superficie frontale*, e l'intersezione della superficie frontale con la superficie terrestre fornisce una linea detta *fronte*. Se una massa d'aria fredda si sta muovendo orizzontalmente verso una massa d'aria calda, obbligherà la massa calda a salire bruscamente, causando la nascita sia di un *fronte caldo* che di un *fronte freddo*, con quest'ultimo che seguirà a ruota il primo.

delle prime carte meteorologiche) tengono anche traccia dei *fronti*, delle zone di precipitazione, di *cicloni* e *anticicloni*. Sulla base di tutte queste informazioni si riesce ad estrapolare l'andamento dei moti atmosferici con il fine di predire l'evoluzione delle isobare e dei fenomeni citati, e formulare così una previsione sullo stato meteorologico futuro (in FIGURA 1.2 è riportato un esempio di carta sinottica comprensiva dell'informazione sui fronti).

1.3.3 I modelli atmosferici

World Meteorological Organization

Con l'affermarsi dei nuovi concetti provenienti dalla Scuola Norvegese, la tendenza alla collaborazione internazionale prese sempre più piede. Nel 1873 nacque l'International Meteorological Organization (I.M.O.), alla quale presero parte tutti i direttori dei servizi meteorologici nazionali, e quasi ottant'anni più tardi, nel 1951, dalle sue ceneri venne fondata la World Meteorological Organization (W.M.O.), più conosciuta in Italia come *Organizzazione Meteorologica Mondiale* (O.M.M.). Quest'agenzia delle Nazioni Unite aveva e ha ancora oggi il compito di stabilire collaborazioni con organizzazioni scientifiche di tutto il pianeta per la realizzazione di ricerche speciali in campo meteorologico. All'interno della O.M.M. prese vita la World Weather Watch (W.W.W.), un sistema mondiale per l'osservazione dei fenomeni meteorologici e per l'organizzazione, l'accentramento, lo scambio e l'elaborazione dei dati con il fine di consentire, in qualsiasi parte del mondo, l'analisi rapida dei dati con metodi omogenei e l'emissione di previsioni e rassegne climatologiche. Con la W.W.W. si è avuto anche lo sviluppo di nuove ricerche intese a migliorare gli strumenti di osservazione o a crearne di nuovi: sono nati i *satelliti meteorologici*, le *stazioni automatiche* sugli oceani e su zone terrestri di difficile accesso, e i *radar meteorologici* (strumento d'osservazione principe in questo lavoro di tesi). Inoltre si è verificato un notevole incremento delle osservazioni terrestri, tanto in superficie quanto in quota, e delle osservazioni marine su navi di tutto il mondo e su navi specificatamente meteorologiche oltre che tramite boe meteorologiche.

Il modello dell'atmosfera

Di questo enorme aumento della strumentazione osservativa ha però continuato a beneficiarne esclusivamente la Meteorologia Sinottica, le cui previsioni derivavano dall'analisi soggettiva, basata sull'esperienza e sulla com-

petenza del singolo meteorologo, delle carte sinottiche. Bisogna attendere gli inizi del XX secolo perché il sistema di predizione del tempo inizi a coinvolgere dei *modelli matematici* dell'atmosfera, perdendo carattere soggettivo e acquisendo sempre maggiore automaticità.

Infatti fu grazie agli studi pionieristici del meteorologo norvegese Vilhelm Bjerknes (1862–1951) che la scienza del tempo compì la definitiva metamorfosi: da scienza empirica, basata sull'analisi delle carte sinottiche, si convertì con pieno diritto in una branca della fisica, la *fisica dell'atmosfera*. Per il suo fondamentale contributo, Bjerknes viene ricordato come il padre della meteorologia moderna.

Per molti anni Bjerknes non venne minimamente a contatto con la meteorologia, dedicandosi a spinose questioni di fisica teorica, ma nel 1896 fu incuriosito a tal punto dallo studio di un fisico polacco inerente la comparsa di alcuni mulinelli nei fluidi, che decise di approfondire l'argomento, fino alla pubblicazione della prima versione del *Teorema della Circolazione* (colonna portante della attuale Meteorologia Dinamica). In quel momento Bjerknes ancora non intuiva i risvolti che si sarebbero potuti avere applicando il suo teorema ai moti atmosferici, ma grazie alle osservazioni di alcuni meteorologi il fisico norvegese iniziò a interessarsi di geofisica, e nel suo scritto del 1904 intitolato *The problem of weather prediction considered from the point of view of Mechanics and Physics* [15] arrivò alla conclusione razionalista che il problema della predicibilità del tempo potesse considerarsi di tipo *deterministico*[12]. Bastava conoscere con sufficiente accuratezza lo stato dell'atmosfera a un certo istante iniziale t_0 (le cosiddette *condizioni iniziali*) e, disponendo delle equazioni e delle leggi che governano i moti e i processi atmosferici sarebbe stato possibile, non prima di aver risolto complessi sistemi non-lineari alle derivate parziali, simulare lo stato dell'atmosfera a un generico istante $t > t_0$, proiettando nel futuro lo stato atmosferico.

Tuttavia Bjerknes incontrò immediatamente delle difficoltà nella messa in pratica della sua idea, perché il sistema di equazioni che governava i fenomeni atmosferici – e costituente il *modello matematico* dell'atmosfera – era di tipo non-lineare, e questo impediva automaticamente di ottenere soluzioni esatte.

[12]Un problema di tipo *deterministico* è un tipo di problema la cui soluzione può conoscersi con certezza, senza l'intervento di processi aleatori. Si contrappone al problema *probabilistico*, e come si vedrà più avanti le previsioni meteorologiche possono seguire, a seconda del metodo utilizzato, una filosofia deterministica oppure una filosofia probabilistica.

Il metodo alle differenze finite

Bisogna aspettare il fisico inglese Lewis Fry Richardson (1881–1953), qualche anno più tardi, per vedere messe in pratica le idee di Bjerknes. L'apporto di Richardson fu quello di usare il *metodo alle differenze finite* per trasformare le complesse equazioni non-lineari alle derivate parziali in un sistema di equazioni algebriche, valide però per un numero finito di punti dello spazio, introducendo così un certo errore di approssimazione. Noti i valori dei parametri meteorologici al tempo zero in questi punti, chiamati *punti di griglia*, la previsione a un tempo successivo era rappresentata dalla soluzione del sistema algebrico. I nuovi valori ottenuti dalla risoluzione del sistema sarebbero stati, a loro volta, valori di partenza per un'ulteriore previsione.

Ma la procedura, benché teoricamente possibile, richiedeva un numero enorme di operazioni aritmetiche, anche per una previsione a brevissimo termine e su un'area molto limitata. Lo scoprì a sue spese Richardson quando decise di provare a produrre una previsione meteorologica retroattiva di tipo numerico basandosi sui dati delle 7:00 di mattina del 20 Maggio 1910, dati raccolti nell'arco di diversi giorni in vari punti di una piccola regione a nord della Francia. L'idea era di cercare di pronosticare il tempo delle sei ore successive a quella data, ma i risultati furono molto deludenti: non solo impiegò un mese e mezzo solamente per portare a termine i lunghi calcoli, ma in aggiunta ottenne previsioni che risultarono molto diverse dalle condizioni meteo effettive di quelle sei ore[13]. Anni dopo, in un libro in cui esponeva i suoi scritti [92], scrisse:

> Al fine di prevedere lo stato dell'atmosfera più rapidamente della sua evoluzione reale, ci vorrebbero 64 000 persone organizzate per turni di lavoro. (Lewis Fry Richardson, 1922)

Nello stesso libro una ormai famosa illustrazione interpreta artisticamente questa fantasticheria di Richardson: una *fabbrica delle previsioni meteorologiche* in cui migliaia di calcolatori umani lavorano in perfetta sintonia,

[13] In realtà, come spiega il meteorologo Peter Lynch (1944–) in un suo libro [68], è vero che la previsione di Richardson fallì in modo drammatico, prevedendo un enorme aumento della pressione in sei ore quando in realtà essa si mantenne più o meno su un valore costante, ma un'analisi dettagliata mostra che la causa dei questo balordo aumento fu semplicemente la mancata applicazione di tecniche di regolarizzazione dei dati, che avrebbero rimosso picchi di pressione non fisici. Infatti, quando queste vengono applicate, la previsione di Richardson si rivela sostanzialmente accurata: un risultato notevole, considerando che i calcoli furono eseguiti a mano, e oltretutto mentre prestava servizio con l'unità di ambulanza quacchera nel nord della Francia.

FIGURA 1.3: **La fabbrica delle previsioni di Richardson.** Nell'illustrazione, 64 000 computer umani siedono su scranni incastonati all'interno di una struttura a forma di globo. Ogni calcolatore è responsabile di risolvere le equazioni differenziali relative al suo specifico quadrante di superficie terrestre. Un piedistallo centrale ospita una figura che conduce le operazioni degli elaboratori umani, illuminando con un fascio di luce i quadranti della terra in cui il calcolo procede troppo rapidamente o troppo velocemente rispetto alla velocità media.

guidati da una sorta di direttore d'orchestra centrale (si veda la FIGURA 1.3). In quello stesso libro, Richardson progetta la griglia spaziale sulla quale svolgere i calcoli, con il risultato mostrato in FIGURA 1.4.

Due ordini di difficoltà

Dagli studi teorici di Richardson, perciò, nacque il primo *modello dinamico* per le previsioni meteorologiche, ma due ordini di difficoltà osteggiavano il nuovo filone delle previsioni basate sui modelli. In primo luogo, la difficoltà nella risoluzione del sistema non-lineare che governava l'evoluzione delle condizioni atmosferiche. Per rendere più snello il sistema, e permettere maggiore facilità di risoluzione a coloro che avrebbero dovuto risolverlo con carta e penna, si ricorreva ad approssimazioni sul modello matematico atmosferico, le quali sì portavano alla semplificazione del sistema di equazioni, ma al contempo far questo equivaleva a studiare un'atmosfera non più reale (e complessa) ma fittizia (e semplificata), con conseguente introduzione di errore. In secondo luogo, l'individuazione delle condizioni atmosferiche al tempo iniziale t_0 non era mai esente da errore, e non lo è

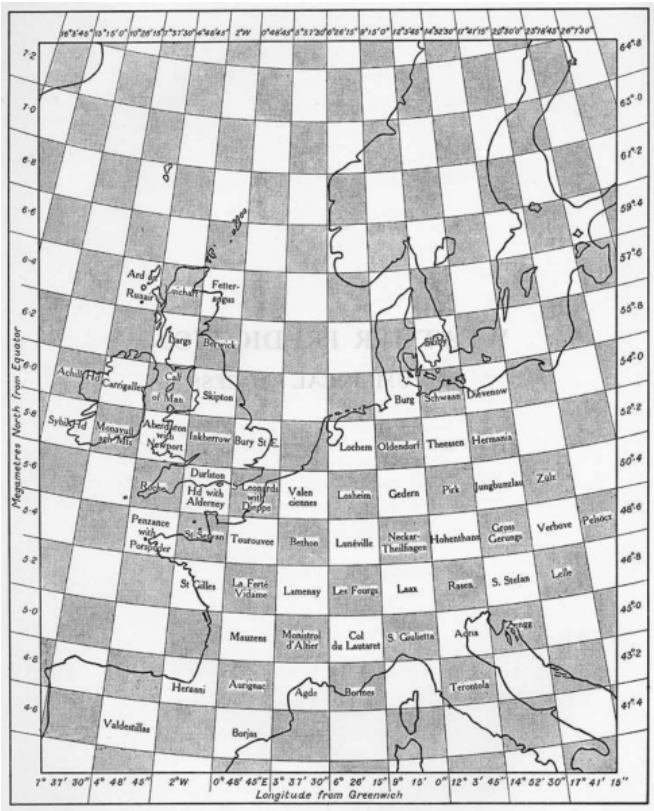


FIGURA 1.4: **Griglia numerica di Richardson.** L'immagine, riportata da Richardson nel suo libro del 1922 intitolato *Weather Prediction by Numerical Process* [92], mostra la griglia spaziale da lui utilizzata per il suo modello numerico. La griglia fu studiata provando a massimizzare la corrispondenza tra le celle e la disposizione delle stazioni meteorologiche, e usando i dati di pressione al suolo al centro delle celle grigie, e i dati del vento al centro di quelle bianche.

ancora oggi. Perché per quanto si possa disporre di strumentazioni all'avanguardia, non si riuscirà mai a ottenere il preciso stato atmosferico a un certo istante senza commettere alcun errore.

Ecco, quindi, che con queste due principali fonti d'errore la via dei modelli matematici sembrava non poter portare a risultati degni di nota.

1.3.4 La previsione numerica

Il primo calcolatore elettronico

La svolta si ebbe nel 1946 con l'introduzione di ENIAC, il primo calcolatore elettronico della storia. Costruito presso l'Università della Pennsylvania, ENIAC pesava circa 27 000 kg e occupava circa 170 m^2. Era dotato di più

di 17 000 valvole termoioniche, che rompendosi spessissimo necessitavano di essere sostituite in continuazione, interrompendo l'elaborazione della macchina [26]. Uno dei suoi principali promotori fu il matematico John Von Neumann (1903–1957), il quale subito si rese conto che il problema delle previsioni meteorologiche tramite modelli sarebbe stato l'ideale per mettere alla prova le potenzialità della nuova macchina. E fu così che nel 1950, nonostante le difficoltà, ENIAC fornì la prima previsione numerica meteorologica della storia[14]. Alla programmazione del grosso calcolatore elettronico si dedicarono, per 33 giorni, il meteorologo statunitense Jule Charney (1917–1981), il matematico John von Neumann e il meteorologo norvegese Ragnar Fjørtoft (1913–1998), ottenendo con buoni risultati tre previsioni a 24 ore [22].

Il metodo di previsione numerica

Così finalmente il calcolatore elettronico era intervenuto in aiuto al *metodo dei modelli*, fornendo quell'ausilio computazionale che era mancato a Richardson e facendo le veci di quella *fabbrica delle previsioni* che egli sognava. Infatti l'uso di elaboratori elettronici al posto di calcolatori umani consentì la risoluzione rapida, tramite l'uso del metodo alle differenze finite, dei sistemi non-lineari che governano l'evoluzione dei *parametri atmosferici* descriventi una particella d'aria (velocità, pressione, temperatura, densità e umidità relativa). Usati ancora ai giorni nostri, questi sistemi, costituiti nel caso generale da sette equazioni differenziali alle derivate parziali descriventi i processi fisici che avvengono nell'atmosfera (processi di natura fisica, chimica o fluidodinamica), fanno parte di un modello matematico che descrive i fenomeni atmosferici denominato *Modello Generale della Circolazione*[15], spesso abbreviato in GCM, acronimo derivante dalla dicitura inglese *General Circulation Model*. Il sistema non-lineare di equazioni differenziali descriventi il GCM viene risolto per ogni singolo punto di una

[14] La previsione di ENIAC risultò migliore rispetto a quella di Richardson di alcuni decenni prima, anche se venne utilizzato un modello per l'atmosfera molto semplificato. Proposto dal meteorologo svedese Carl-Gustaf Rossby (1898–1957), si trattava di un modello che limitava i movimenti dell'aria al solo piano orizzontale, semplificando notevolmente le equazioni e, di conseguenza, i tempi di calcolo.

[15] L'applicazione pratica di un GCM comporta tre distinte fasi. Innanzitutto l'inserimento dei dati iniziali all'interno del modello, e la generazione conseguente di un'*atmosfera iniziale*. Successivamente la risoluzione delle equazioni, propagando la soluzione di istante temporale in istante temporale; infine, ottenute le previsioni in ogni punto della griglia, per ogni istante temporale e per ogni variabile atmosferica, la trasposizione grafica dei risultati pronosticati in forma di carte meteorologiche (contenenti ad esempio le classiche isobare oppure curve di altro tipo, come curve iso-temperatura).

Fenomeno atmosferico	**L**	**T**
Microturbolenza	10–100 cm	pochi secondi
Tornado	10 – 500 m	10 – 60 minuti
Temporale	1 – 5 km	poche ore
Brezza marina	5 – 50 km	6 ore
Onde orografiche	10 – 100 km	giorni
Uragani	300 – 500 km	giorni – settimane
Cicloni, anticicloni e fronti	100 – 5000 km	giorni – settimane
Circolazione atmosferica	globale	stagioni – anni
Variazioni climatiche	globale	decadi

TABELLA 1.1: **Scale spazio-temporali dei fenomeni atmosferici.** Nella tabella soprastante sono indicate le lunghezze caratteristiche (L) e i tempi caratteristici (T) relativi ad alcuni fenomeni atmosferici [25]. Si nota come spesso la scala spaziale vada di pari passo con la scala temporale, creando un profondo legame tra lunghezze e tempi su cui si sviluppano le fenomenologie atmosferiche.

griglia tridimensionale coprente tutto il globo: l'intera superficie terrestre viene suddivisa in *quadranti*, come fosse una scacchiera, e l'atmosfera viene sezionata su più livelli in modo tale che, prolungando i quadranti verso l'alto, si ottenga una griglia tridimensionale sulla quale il modello calcolerà l'evoluzione futura delle variabili atmosferiche.

La scala spaziale

Tipicamente, prima di risolvere le equazioni differenziali nella loro interezza, si fa l'*analisi della scala di moto* per determinare eventuali approssimazioni semplificative. Infatti i movimenti dell'atmosfera possono avvenire su diversi livelli di scala, ognuno con la sua lunghezza caratteristica (si veda la TABELLA 1.1): dai moti microscopici, alle trombe d'aria (pochi metri), fino alle perturbazioni (centinaia di chilometri) o addirittura agli uragani (migliaia di chilometri). Con un'analisi opportuna della *scala di moto* del fenomeno in analisi, si possono individuare le forze in gioco che dominano, trascurando le restanti e portando a una semplificazione delle equazioni. Il fine di questa semplificazione è quello di cercare il più possibile di accorciare i tempi di ottenimento dei risultati, perché più tempo trascorre dall'inizio dei calcoli, più previsione risulta inutile.

Pertanto lo sviluppo della meteorologia numerica procederà di pari passo con lo sviluppo dell'informatica e dei microprocessori. Infatti, più potenti e veloci saranno gli elaboratori, minori saranno i tempi di calcolo, e al

contempo minori semplificazioni si potranno operare sui modelli, ottenendo maggiore accuratezza nelle previsioni.

L'effetto farfalla

Al contempo, però, resta la fonte d'errore dovuta alla imprecisa misurazione delle *condizioni iniziali*. Perché è vero che, nel corso degli anni, misurazioni sempre più sofisticate delle variabili atmosferiche in un certo istante hanno permesso di migliorare sempre di più la descrizione dello stato dell'atmosfera al tempo t_0, riducendo la discrepanza tra condizioni misurate e condizioni reali, ma resta comunque il problema della imprevedibile caoticità insita nei moti atmosferici, a cui spesso ci si riferisce parlando di *effetto farfalla*. Questa denominazione deriva da una provocazione lanciata dal matematico e meteorologo Edward Norton Lorenz (1917–2008) in un suo intervento sulla predicibilità durante il 139° incontro dell'American Association for the Advancement of Science. In quell'occasione, Lorenz affidò alla sua bocca le parole che poi divennero manifesto della *teoria del caos*[16]:

> Può il battito d'ali di una farfalla in Brasile scatenare un tornado in Texas? (Edward Lorenz, 1979)

Per quanto poetico sia il fatto che il battito d'ali di una farfalla in Brasile possa produrre eventi atmosferici a cascata che, a partire dalla piccolissima perturbazione atmosferica prodotta dalle ali della farfalla, possano portare qualche settimana dopo alla generazione di un tornado in Texas, questa celebre domanda esprime benissimo come un sistema caotico come il tempo non possa essere predetto se non per pochi giorni [116]. Perché siccome non si possono conoscere le piccolissime perturbazioni che casualmente possono interessare l'atmosfera (come un battito d'ali di una farfalla), a maggior ragione non si possono conoscere le conseguenze che esse potranno avere qualche settimana dopo, rendendo impossibili le previsioni a lungo termine.

[16] In matematica la *teoria del caos* porta avanti lo studio, attraverso modelli propri della fisica matematica, dei sistemi dinamici che esibiscono una sensibilità esponenziale rispetto alle condizioni iniziali. I sistemi di questo tipo, pur governati da leggi deterministiche, mostrano un'empirica casualità nell'evoluzione delle variabili dinamiche che li descrivono. Questo comportamento casuale, tuttavia, è solo apparente, in quanto si manifesta solamente nel momento in cui si confronta l'andamento temporale asintotico di due sistemi con configurazioni iniziali arbitrariamente *simili* tra loro, ma non *identiche*. É l'impercettibile differenza nelle condizioni iniziali che genera evoluzioni così diverse da sembrare frutto del caso [80].

Questo suggerisce che esiste un limite invalicabile al miglioramento di accuratezza delle previsioni meteorologiche, limite che nessun aumento di potenza di calcolo degli elaboratori, per quanto grande essa sia, riuscirà ad aggirare. Lo stesso Lorenz nel 1962 dimostrò le ragioni di questo limite, provando che l'atmosfera è un sistema governato dalle leggi del caos, e in quanto tale non siamo in grado di stabilire con assoluta precisione le sue condizioni iniziali, limitando automaticamente a un massimo di una settimana la possibilità di anticipare le condizioni meteorologiche. Sempre utilizzando le parole di Lorenz, "la dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali in sistemi dinamici non lineari (come ad esempio l'atmosfera) è la causa dell'apparente aleatorietà presente nei processi osservati", che dunque di per sé non sono aleatori, ma *sembrano* aleatori in quanto una minima variazione nelle condizioni iniziali può causare sviluppi diversissimi nel corso del tempo.

Le previsioni probabilistiche

Su queste fondamenta sono nate, recentemente, le *previsioni probabilistiche*, che al contrario delle *previsioni deterministiche* non forniscono una singola previsione, bensì uniscono diversi possibili sviluppi futuri (denominati *Ensambles*), ottenuti variando leggermente le condizioni iniziali, e associano una probabilità di accadimento a ciascuna condizione futura. In questo modo il pronostico stesso contiene dentro di sé l'indicazione dell'incertezza ad esso associata.

Il futuro delle previsioni numeriche

In conclusione, se l'errore dovuto alla semplificazione dei modelli può essere ridotto grazie all'aumento della potenza di calcolo dei supercomputer (con la FIGURA 1.5 che mostra un esempio di miglioramento delle abilità previsionali dei modelli numerici negli anni), d'altra parte l'errore dovuto alla difficoltà nel definire alla perfezione le condizioni iniziali non può essere ridotto di molto. Questo pone un limite alla predicibilità, e indirizza la previsione meteorologica non tanto verso la ricerca di previsioni affidabili fornite con maggiore anticipo, quanto verso il miglioramento delle proiezioni sul breve e medio periodo (su cui resta ampio margine di miglioramento), e verso l'utilizzo di previsioni sempre più probabilistiche. Per questo potrebbe non essere lontano il momento in cui si sentirà il meteorologo parlare di *probabilità* della previsione durante il suo bollettino meteo.

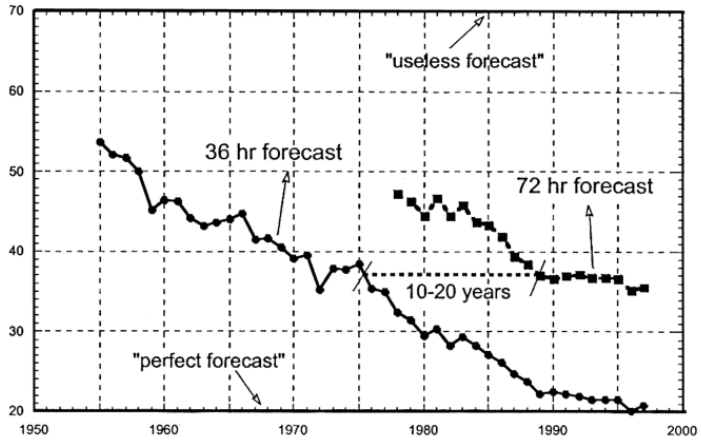


FIGURA 1.5: **Qualità delle previsioni numeriche negli anni.** Il grafico soprastante mostra l'evoluzione delle abilità di previsione dei modelli numerici nel Nord America. L'indice di qualità utilizzato per quantificarle è l'*S1 score*, che misura l'errore relativo commesso nella previsione del gradiente di pressione a una quota media troposferica.

1.3.5 I metodi di nowcasting

L'estrapolazione da radar

Tuttavia i metodi numerici si sono rivelati poco affidabili nella generazione di previsioni valide per le primissime ore, ovvero fino alle $3h$, soprattutto a causa della forte vicinanza alle imperfette condizioni iniziali. In più i tempi di elaborazione non permettono concretamente di disporre immediatamente di previsioni numeriche, che perciò sono indisponibili nei primi minuti. Per questi motivi, con il fine di migliorare le previsioni a brevissimo termine – identificate dalla parola inglese *nowcasting*, in cui la particella *now* sottolinea la brevissima scadenza di queste – si sono sviluppati alcuni metodi basati sull'estrapolazione di previsioni a partire da sequenze di immagini radar[17].

Il metodo degli analoghi

Tuttavia, poiché su zone a orografia complessa (come zone collinari o montuose) l'errore commesso dai metodi d'estrapolazione sopra citati aumenta per via della nascita di ulteriori fenomenologie legate all'interazione delle

[17]Per i dettagli attorno ai metodi estrapolativi si veda – pur consigliando di procedere la lettura secondo l'ordine proposto – il capitolo intitolato *I metodi di estrapolazione*.

masse atmosferiche con le pendenze orografiche, negli ultimi anni si è introdotta una nuova metodologia di *nowcasting* pensata appositamente per le zone a orografia complessa, il *metodo degli analoghi*, oggetto del presente studio di tesi[18].

Più avanti, saranno i due capitoli intitolati *I metodi di estrapolazione* e *Il metodo degli analoghi* ad approfondire le due tecniche appena citate.

1.4 Le osservazioni meteorologiche

Qualsiasi sia il metodo di previsione scelto, non si può prescindere da un primo stadio comune a tutti: l'*osservazione meteorologica*. Infatti, che si tratti del metodo delle isobare, del metodo numerico, del metodo di estrapolazione da radar o del metodo degli analoghi, occorre osservare e misurare grandezze e parametri meteorologici (come pressione, temperatura, umidità, intensità e direzione del vento, quantità di precipitazione ecc.) al fine di pervenire, con la più alta precisione possibile, a un quadro completo dello stato atmosferico in un dato istante. A tal fine, l'aspetto fondamentale è la necessità di *simultaneità* mondiale nella raccolta dei dati (perciò si parla di *osservazioni sinottiche*), in modo tale da ottenere informazioni meteorologiche contemporanee di diversa natura su un'ampia scala spaziale, al limite sull'intero globo.

Perché questo scopo possa essere raggiunto, occorre un ente che gestisca la distribuzione spaziale e la manutenzione degli strumenti d'osservazione e coordini le tempistiche delle misurazioni. É la *World Meteorological Organization* (W.M.O.), e nello specifico la sezione chiamata *Global Observing System* della divisione W.W.W. (*World Weather Watch*) a ricoprire questo ruolo, prodigandosi al contempo nella promozione della continua espansione del network osservativo mondiale. Una volta che i dati sono stati acquisiti dalle singole unità osservative, il sistema W.I.S. (*WMO Information System*) ne permette la trasmissione su scala globale. Sono perciò raccolti in centri WMO in cui potenti computer li processano, per poi essere utilizzati con finalità principalmente climatologiche, agrometeorologiche o di previsione.

Attualmente, la W.M.O. coordina e gestisce[19]:

[18]Per dettagli attorno a questa tecnica di previsione a brevissimo termine, si veda il capitolo *Il metodo degli analoghi*.

[19]I dati elencati provengono dal sito internet della W.M.O., sezione *Observations* (si veda `https://public.wmo.int/en/our-mandate/what-we-do/observations`).

- più di 10 000 stazioni meteorologiche di superficie (sia presidiate che automatiche),
- quasi 7 000 navi meteorologiche,
- circa 1 000 boe meteorologiche,
- circa 3 000 aerei commerciali equipaggiati per osservazioni meteorologiche,
- circa 1 000 stazioni per i radiosondaggi,
- più di 30 satelliti con funzioni meteorologiche,
- centinaia di radar meteorologici.

Si tratta di un dispiegamento di mezzi eccezionale, finalizzato alla raccolta di dati in superficie (terrestre o marina) e in quota. Nei paragrafi che seguono li si descriverà brevemente, lasciando che il lettore si stupisca di quanto variegato sia il mondo delle osservazioni meteorologiche.

1.4.1 Le stazioni meteorologiche

Una *stazione meteorologica* è costituita un insieme di strumenti di misura che permettono di monitorare le condizioni fisiche della bassa atmosfera in un dato luogo e per un tempo indefinito. Può essere allestita in ogni punto della superficie terrestre, che sia pianura, collina o montagna, e perfino in mare aperto. Il tipico equipaggiamento di una stazione meteorologica prevede sei strumenti: un *termometro*, un *barometro* (per la misura della pressione atmosferica), un *igrometro* (per la misura dell'umidità atmosferica), un *anemometro* (per la misura della velocità del vento), una *banderuola* (per la misura della direzione del vento) e un *pluviometro* (per la misura della quantità di pioggia caduta). Tra le strumentazioni accessorie, invece, possono trovarsi diversi sensori, come il *piranometro* (per la misura dell'intensità della radiazione solare) o il sensore per la misura dell'umidità del terreno.

Esistono stazioni meteorologiche di due tipologie: *presidiate*, oppure *automatiche*. Le stazioni meteorologiche *presidiate* prevedono l'impiego di personale per poter completare le informazioni da integrare ai dati rilevati, come ad esempio informazioni sulla visibilità, sul tipo di copertura nuvolosa e sulla variazione delle condizioni meteorologiche rispetto alla rilevazione immediatamente precedente. Le stazioni meteorologiche *automatiche*, invece, rilevano automaticamente tutti i dati meteorologici e, grazie a un

sistema trasmittente, li inviano alla rete GTS (*Global Telecommunication System*) della W.M.O., che li redistribuisce.

1.4.2 Le navi meteorologiche

Una *nave meteorologica* era una nave che stazionava nell'oceano per collezionare dati meteorologici atmosferici in corrispondenza di superfici non terrestri. Si trovavano principalmente nel Nord Atlantico e nel Nord Pacifico, e trasferivano i dati acquisiti via radio. Oltre alla loro funzione meteorologica, queste navi contribuivano alle operazioni di ricerca e soccorso, fornivano ausilio ai voli transoceanici e fungevano da piattaforme per la ricerca oceanografica, oltre che per il monitoraggio dell'inquinamento marino.

Le osservazioni sulle navi meteorologiche si sono dimostrate utili per la segnalazione e per la previsione di grossi eventi meteorologici, oltre che per il monitoraggio delle tempeste marine, come i cicloni tropicali. A partire dagli anni '70, a causa del costo significativo si è iniziato il rimpiazzo delle navi meteorologiche con *boe meteorologiche* (si veda il prossimo paragrafo), decisamente più economiche, e nel 2010 è stata ritirata dal servizio l'ultima nave meteorologica, la *Mike*. Tuttavia le osservazioni meteorologiche a bordo di navi continuano ancora oggi, grazie all'installazione da parte della W.M.O. di apparecchiature meteorologiche su migliaia di navi mercantili.

1.4.3 Le boe meteorologiche

Una *boa meteorologica* è uno strumento galleggiante, lasciato alla deriva oppure ancorato sul fondale marino, che raccoglie dati oceanici e atmosferici. Con il declino delle navi meteorologiche, il ruolo di queste boe è stato sempre più centrale nella misura delle condizioni atmosferiche in corrispondenza di superfici marine. La tipologia di boa meteorologica *alla deriva* è la più diffusa, con circa 1 200 esemplari.

1.4.4 Gli aerei del programma AMDAR

É vero che il traffico aereo dipende dalle previsioni meteorologiche, ma è altrettanto vero che le previsioni meteorologiche esistono, in parte, grazie al traffico aereo. Infatti gli strumenti meteorologici presenti a bordo di un velivolo, e finalizzati all'analisi delle condizioni meteo lungo la rotta, possono fornire ai servizi meteorologici nazionali e, in generale, alla W.M.O. dati relativi a tutti i livelli dell'atmosfera, dalla superficie terrestre (al decollo)

alla stratosfera (in crociera), non rilevabili in altro modo se non usando *radiosonde* (si veda il successivo paragrafo).

Il vantaggio rispetto a queste ultime è che, a parità di qualità delle osservazioni, un profilo verticale di temperatura e vento inviato da un aereo durante la fase di salita o durante la discesa costa meno dell' 1% del costo per un radiosondaggio. Inoltre, gli aeromobili spesso operano su rotte lungo le quali è impossibile raccogliere dati tramite radiosonde, e per questo motivo le informazioni acquisiscono un valore ulteriore.

Da qui la nascita del programma A.M.D.A.R. (*Aircraft Meteorological Data Relay*) in seno alla W.M.O., programma che coinvolge alcune decine di compagnie aeree e circa tremila aeromobili, con il fine di ottenere dati atmosferici di ottima qualità al variare della quota.

1.4.5 Le radiosonde

Le osservazioni in quota, oltre che tramite aerei aderenti al programma A.M.D.A.R., vengono realizzate anche mediante *radiosonde*, apparati equipaggiati con sensori che rilevano pressione, temperatura e umidità dell'aria, per poi inviare le misurazioni per mezzo di una radiotrasmittente a una stazione apposita terrestre. La radiosonda viene portata in quota da un pallone aerostatico riempito di elio, che ascende a velocità costante di circa 5 m/s. La stazione di terra registra automaticamente i dati raccolti alle diverse quote, sino ai 30 km d'altezza. La direzione e l'intensità del vento si deducono dalla posizione istantanea della radiosonda, dotata di un apposito sistema di radionavigazione.

1.4.6 I satelliti meteorologici

Un *satellite meteorologico* è un satellite artificiale in orbita terrestre che viene utilizzato per la raccolta di informazioni sulle condizioni meteorologiche di vaste zone del pianeta. I satelliti meteorologici possono essere di due tipologie: satelliti *geostazionari*, ovvero posti su un'orbita equatoriale e osservanti sempre la stessa aera del pianeta, e satelliti *polari*, posti su un'orbita che passa periodicamente sopra i due poli terrestri, monitorando longitudinalmente tutto il pianeta. Tra le costellazioni di satelliti meteorologici più importanti si trovano i satelliti *Meteosat*, costellazione geostazionaria europea, e i satelliti *Metop*, costellazione polare americana. EUMETSAT, un'organizzazione intergovernativa che ha sede a Darmstadt, in Germania, e che attualmente conta 30 stati membri, opera queste due costellazioni di satelliti meteorologici.

Tipicamente i sensori posti a bordo dei satelliti meteorologici sono *radiometri*, ovvero strumenti che misurano la radianza spettrale emessa dall'atmosfera[20]. Le bande spettrali di acquisizione del radiometro meteorologico sono solitamente la banda del visibile e la banda dell'infrarosso, le uniche bande che permettono di captare la radiazione riflessa o emessa dalle nubi. Con le informazioni provenienti dalle immagini sequenziali prodotte dai radiometri si ottengono le caratteristiche dei corpi nuvolosi e il loro movimento, consentendo di prevedere la localizzazione spaziale della precipitazione.

Ma non sono solamente i satelliti prettamente *meteorologici* a fornire un contributo alle osservazioni atmosferiche e alla scienza meteorologica in generale. Infatti la W.M.O., riconoscendo l'importanza meteorologica dei dati provenienti dai più disparati sistemi spaziali, dai generici satelliti di osservazione nel visibile alle piattaforme orbitali come la stessa ISS (*International Space Station*), ha stabilito nel 2003 lo *WMO Space Programme*, tramite il quale ha iniziato a disporre delle osservazioni e delle misurazioni di diverse centinaia di oggetti spaziali orbitanti attorno al pianeta Terra.

1.4.7 Il radar meteorologico

In ultimo, un *radar meteorologico* è un particolare tipo di radar utilizzato in meteorologia per la rilevazione delle idrometeore, permettendo la valutazione del loro tipo (pioggia, pioggia ghiacciata, neve o grandine), il calcolo del loro moto e la valutazione della loro intensità di precipitazione. In più permette di predire posizione futura delle idrometeore e relativa intensità, specialmente nel campo delle previsioni meteorologiche a brevissima scadenza (già denominate *nowcasting*).

Poiché, per quanto concerne la parte relativa alle osservazioni meteorologiche, questo incredibile strumento meteorologico costituirà l'assoluto protagonista del presente lavoro di tesi, si rimanda alla sezione *Il radar meteorologico* all'interno del capitolo *NACO – I dati radar* per una trattazione più dettagliata.

[20]Un *radiometro* è un sensore utilizzato in radiometria per misurare il flusso della radiazione elettromagnetica emesso da una superficie o da un oggetto per effetto della sua temperatura (flusso indicato con il termine *radianza*). Sebbene il termine sia spesso usato per indicare un dispositivo che misura esclusivamente la radiazione infrarossa, si può tuttavia usare per dispositivi misuranti la radiazione emessa su tutte le lunghezza d'onda dello spettro elettromagnetico.

1.5 Classificazione delle previsioni

Le previsioni meteorologiche vengono generalmente classificate in base a due aspetti: uno di natura spaziale, relativo all'estensione dell'area di previsione, e uno di natura temporale, relativo alla gittata temporale della previsione. Nei due paragrafi che seguono si definirà la terminologia meteorologica per riferirsi a ciascuna tipologia di previsione, dettagliandone gli aspetti principali.

1.5.1 L'orizzonte temporale

Come visto all'interno della sezione *L'evoluzione della previsione meteorologica*, relativa al modificarsi nel tempo dei metodi e delle tecniche di previsione meteorologica, e nello specifico come visto nella sottosezione intitolata *La previsione numerica*, la natura intrinsecamente caotica dell'atmosfera – espressa nelle equazioni differenziali non-lineari che ne descrivono il comportamento –, il massiccio sforzo computazionale richiesto per pervenire a dei risultati, l'errore inevitabile commesso nella osservazione delle condizioni iniziali e una comprensione incompleta dei processi fisici atmosferici portano necessariamente alla diminuzione dell'accuratezza previsionale quando l'intervallo temporale di previsione aumenta. É per questo motivo che, a seconda dell'ampiezza di questo intervallo, la metodologia di previsione cambia, e si distinguono previsioni:

→ **a brevissimo termine**: entro le 6 ore;

→ **a breve termine**: dalle 6 ore ai 3 giorni;

→ **a medio termine**: dai 4 giorni alla settimana;

→ **a lungo termine**: dalla settimana alle due settimane;

→ **stagionali**: dal mese ai 3 mesi.

Queste distinzioni possono variare leggermente a seconda della fonte bibliografica scelta[21], ma comunque si tratta di piccole modifiche agli intervalli temporali di ciascuna categoria.

[21] Per la classificazione appena riportata si è fatto riferimento ai dati contenuti all'interno del sito internet del *CentroMeteo*, sezione *Guida pratica alle previsioni* (`http://www.centrometeo.com/previsioni-meteo/guida-pratica-previsioni`), e al sito internet del *Consorzio LaMMA*, all'interno della sezione *La previsione* (`http://www.lamma.rete.toscana.it/meteo/la-previsione`).

Nei sottoparagrafi che seguono si descriverà ciascuna di queste cinque categorie basate sull'orizzonte temporale di previsione, accennando alle metodologie di previsione tipiche per ciascuna di esse.

La previsione a brevissimo termine

Caratterizzate da una gittata temporale ridottissima[22] (non oltre le 6h di anticipo), le previsioni *a brevissimo termine* si basano generalmente sull'utilizzo di metodi d'estrapolazione applicati a osservazioni radar ad alta risoluzione spaziale e temporale. La resa terminologica inglese, costituita dall'unica parola *nowcasting* – fusione dell'avverbio temporale *now*, "adesso", e del sostantivo *forecast*, "previsione" – identifica immediatamente la natura di questa previsione, valida per l'immediatissimo futuro.

Questa tipologia di previsione, che rappresenta una recente novità nel campo delle previsioni meteorologiche, può utilizzare in input differenti tipologie di dato. Primo su tutti, il dato proveniente dal radar meteorologico, in quanto questo strumento, che ad oggi è il più importante per il *nowcasting*, permette di monitorare in tempo reale la dimensione e la velocità delle nubi temporalesche fornendo osservazioni ad alta risoluzione temporale e spaziale. Ma non è raro che ci si serva anche di altre tipologie di osservazioni, come delle immagini satellitari, che pur intervenendo con una risoluzione spaziale inferiore, completano lo scenario informativo, permettendo di acquisire una visione d'insieme. Oppure ancora, a volte si attinge a misurazioni effettuate a terra o in quota, e alle volte si confeziona una previsione in collaborazione con modelli meteorologici ad aera limitata (i cosiddetti LAM, *Limited Area Model*).

Concentrandosi su un brevissimo intervallo temporale, il *nowcasting* riesce a prevedere eventi atmosferici minori, come singoli rovesci o temporali, con ragionevole accuratezza, nonché altri fenomeni meteorologici troppo piccoli per essere risolti da un modello matematico. Per farlo, nella stragrande maggioranza dei casi si utilizza la tecnica dell'*estrapolazione di immagini radar*, determinando la posizione futura dei campi di pioggia sulla base dello spostamento osservato nelle sequenze di immagini radar a disposizione (tecnica che sarà dettagliata all'interno del capitolo intitolato *I metodi di estrapolazione*).

[22] Stando alla definizione della W.M.O., una previsione di *nowcasting* dev'essere entro le 2h di anticipo per potersi dire tale, ma grossa parte della bibliografia meteorologica tipicamente fissa sulle 6h questo limite superiore.

Per concludere, le previsioni a brevissimo termine sono risultate di fondamentale importanza per molti campi, e in particolare per la navigazione aerea. Infatti, soprattutto nelle fasi critiche di decollo e atterraggio, il verificarsi di fenomeni meteorici intensi, quali venti discendenti, fulmini o temporali, anche se di durata brevissima, può essere estremamente pericoloso, portando anche a incidenti gravi. Di recente, inoltre, si è ricorsi al *nowcasting* per l'anticipazione di eventi meteorologici estremi, quali temporali, alluvioni, uragani o tornado, con lo scopo di fornire un'allerta in tempi utili. In più, assume grande importanza anche in tutte quelle attività che traggono vantaggio dalla conoscenza dello stato dell'atmosfera nell'immediato futuro, come la nautica, l'escursionismo, le gare sportive all'aperto, la pianificazione di eventi o l'assistenza al volo aereo, risultando così la tipologia di previsione probabilmente più utile.

La previsione a breve termine

Per le *previsioni a breve termine* la gittata temporale aumenta non poco rispetto a quella del *nowcasting*. Infatti, una previsione con questa caratteristica rientra in un orizzonte temporale di previsione compreso tra le 6 ore e i 3 giorni, con una automatica decrescita dell'affidabilità rispetto alle previsioni a brevissimo termine.

Questo tipo di previsioni si basa solitamente su modelli matematici dell'atmosfera dall'applicazione dei quali, dopo opportuna risoluzione tramite metodi numerici, si ottiene un pronostico di tipo perlopiù *deterministico*. Questo significa che, a partire dallo stato iniziale dell'atmosfera, i modelli meteorologici elaborano una sola simulazione dei principali parametri meteorologici, dando esito a una previsione univoca.

Come già sottolineato, le condizioni iniziali sono estremamente importanti nell'elaborazione deterministica, perché con più precisione riescono a descrivere lo stato iniziale dell'atmosfera, più corretta sarà l'evoluzione pronosticata dal modello. Inoltre, è fondamentale la competenza del meteorologo al momento della configurazione del modello atmosferico, perché l'impossibilità di fornire condizioni iniziali perfettamente aderenti alla realtà rende necessaria la correzione del modello laddove l'esperienza del meteorologo lo ritenga opportuno, in modo da compensare almeno parzialmente l'errore nelle condizioni iniziali. Infine, gli *output* del modello vengono analizzati e interpretati dai meteorologi, e successivamente resi accessibili alle utenze sotto forma di bollettini testuali e immagini.

La meteorologia recente, tuttavia, promuove sempre più i pronostici di tipo *probabilistico*, per cui è sempre più frequente imbattersi in studi che

concernono previsioni probabilistiche, con una misura dell'incertezza insita nella previsione stessa.

La previsione a medio-lungo termine

Queste due tipologie di previsione, per la somiglianza che li caratterizza a livello di metodologie previsionali, vengono spesso unite a formare un unico tipo di previsione, quella *a medio-lungo termine*. Nel complesso, questa previsione si staglia entro un orizzonte temporale compreso tra i 4 giorni e le due settimane di anticipo, conoscendo un calo ulteriore dell'affidabilità del pronostico rispetto alle previsioni *a breve termine*. É per questo che, a causa della forte incertezza attorno a queste previsioni, diventa importante poter disporre di modelli di tipo *probabilistico* che forniscano, oltre allo scenario più probabile, anche l'incertezza ad esso associata.

L'idea di fondo delle *previsioni probabilistiche* ottenute con il *metodo dei modelli* è quella di non limitarsi a definire una sola condizione iniziale dell'atmosfera, quella osservata (che per quanto sia vicina al reale, non sarà mai esente da errore), ma delineare molteplici condizioni iniziali, leggermente diverse da quella di riferimento, introducendo piccole perturbazioni in determinate zone *sensibili*. Da questo insieme di condizioni iniziali, leggermente diverse tra loro, partono diverse *corse* (il corrispondente del termine inglese *run*), ovvero diverse simulazioni deterministiche, una per ciascuna condizione iniziale. I risultati di ciascuna simulazione, chiamati *membri* (in inglese *members*) di un gruppo detto *ensemble* (dall'inglese "insieme"), possono avere due possibili sorti: essere raggruppati per somiglianza tramite tecniche statistiche, formando gruppi detti *clusters*, oppure essere mediati tra loro, ottenendo un valore di dispersione rispetto a un certo valore climatologico (in questo caso si parla di *ensemble mean*, "media dell'insieme").

Intuitivamente, quando i membri di un *ensemble* sono simili, dando vita a pochi *clusters*, si può essere più confidenti nella previsione. Se invece i *clusters* tendono ad aumentare, l'incertezza diventa maggiore, e più scenari risultano plausibili.

La previsione stagionale

Le *previsioni stagionali*, ancora in fase sperimentale, si collocano a metà strada tra le *previsioni meteorologiche* propriamente dette (il cui range temporale di previsione non si spinge oltre le due settimane) e le *previsioni climatiche* (che possono arrivare a riguardare l'anno intero). Questo tipo

di previsione copre tipicamente l'intero arco di una stagione, oppure una sua parte, e rinuncia al livello di dettaglio spazio-temporale delle comuni previsioni meteorologiche per la bassissima affidabilità che si otterrebbe usando i classici modelli matematici.

Invece, la sfida di questo tipo di previsione è quella di provare a prevedere la tendenza climatica attraverso l'interpretazione di una serie di *indici climatici*, l'analisi dei pattern della circolazione atmosferica a scala sinottica e l'individuazione delle cosiddette *teleconnessioni atmosferiche*[23].

Una volta terminata l'analisi di tutti gli elementi appena elencati, si procede con l'individuazione delle interazioni tra i vari indici, pronosticando le possibili ripercussioni sulle circolazioni atmosferiche nei mesi considerati.

1.5.2 La scala spaziale

Nell'ambito delle previsioni meteorologiche, il concetto di *scala spaziale* è stato storicamente introdotto per tentare di classificare gli innumerevoli fenomeni atmosferici osservati su specifiche scale spazio-temporali, ma al contempo profondamente legati a processi agenti su altre scale. Per esempio, un anticiclone dinamico con dimensioni dell'ordine di migliaia di km^2 potrebbe determinare un piccolo banco di nebbia con dimensioni sul km^2, oppure, nel verso opposto, un temporale estivo con diametro dell'ordine del km^2 potrebbe rilasciare enormi quantità di energia contribuendo significativamente al bilancio energetico sulla grande scala.

Questi esempi mostrano la forte correlazione esistente tra fenomeni sulla piccola scala e fenomeni sulla grande scala, e tuttavia l'individuazione della scala spaziale su cui si verifica un fenomeno atmosferico possiede degli aspetti benefici ai fini della previsione tramite modelli meteorologici. Infatti, a seconda della scala spaziale del fenomeno (determinata da un'apposita *analisi di scala*), è possibile fare un confronto degli ordini di grandezza delle varie forze coinvolte nelle equazioni che descrivono la dinamica atmosferica e, attraverso un'operazione denominata *scaling*, "filtrare" il sistema di equazioni eliminando i termini trascurabili.

[23] Le *teleconnessioni atmosferiche* sono degli schemi di circolazione atmosferici espressione di una parte della variabilità meteorologico-climatica. Due punti dell'atmosfera si dicono *teleconnessi* se i parametri fisico-meteorologici ad essi associati, quali ad esempio la pressione e la temperatura, sono tra loro correlati o anticorrelati nel tempo, ovvero variano in maniera sincrona o anti-sincrona, evidenziando così una stretta correlazione statistica. Poiché l'azione delle teleconnessioni è a scala globale, il loro studio permette di ottenere utili pronostici nell'ambito delle previsioni stagionali.

Le scale spaziali che si distinguono in meteorologia, e in generale in geofisica, sono le seguenti [45] (elencate per estensione crescente, e individuate tramite la loro dimensione caratteristica):

→ **scala piccola (*microscala*)**: entro i 5 km;

→ **scala media (*mesoscala*)**: dai 5 km ai 500 km;

→ **scala sinottica (*macroscala*)**: dai 500 km ai 5000 km;

→ **scala globale (*planetaria*)**: oltre i 5000 km.

Riferendosi a una di queste scale spaziali è possibile non solo individuare l'estensione di un fenomeno meteorologico, ma anche definire l'estensione del dominio spaziale su cui s'intende fornire una previsione meteorologica. Non è raro, tuttavia, imbattersi in riferimenti all'estensione spaziale di una previsione meteorologica che utilizzano termini più intuitivi, e un esempio ne è la seguente sequenza: scala *locale, regionale, nazionale, continentale* e *globale*.

Generalmente le scale principali per le previsioni meteorologiche sono la *sinottica* e la *mesoscala*, per le quali i modelli numerici utilizzati sono di tipo differente[24]. Molte ricerche meteorologiche di mesoscala sono state possibili solo a partire dalla seconda metà del XX secolo grazie all'infittimento notevole delle stazioni osservative di superficie e in quota, e all'introduzione di nuovi strumenti ad alta risoluzione spaziale e temporale, come radar meteorologici e satelliti. La *microscala*, invece, vede fenomenologie deboli e momentanee, generate da fattori locali piuttosto che da fattori meteorologici.

1.6 Articolazione dello studio

Finalizzato allo sviluppo di una tecnica di nowcasting fondata sugli analoghi, questo lavoro di tesi giungerà alla definizione del sistema NACO, *Nowcasting by Analogues over Complex Orography*, mediante il quale condurrà previsioni a brevissimo termine su aree a orografia complessa, per poi verificarne la predicibilità mediante alcuni *score* oltre che mediante il confronto con altri metodi di nowcasting.

[24] Tra i modelli a scala sinottica e globale, due importanti esempi sono il modello GFS (*Global Forecast System*) elaborato dal centro meteorologico nazionale degli Stati Uniti, e il modello del centro meteorologico europeo ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*). Sulla mesoscala, invece, un importante modello numerico è il RAMS.

Prima di arrivare al sistema NACO, tuttavia, si esplorerà lo stato dell'arte per quanto concerne le tecniche di previsione meteorologica a brevissimo termine, muovendosi all'interno della letteratura scientifica del settore.

Nello specifico, il capitolo successivo, intitolato *La predicibilità*, introdurrà il concetto di *predicibilità* associato tanto ai sistemi deterministici quanto a quelli stocastici, trattando il caso del sistema atmosferico. Nel capitolo *I metodi di estrapolazione* si dettaglieranno le caratteristiche delle due principali tecniche di estrapolazione, già precedentemente citate, e se ne descriveranno i limiti ad esse associati. Nel capitolo *Il calcolo del campo di avvezione* si dirà come poter ottenere il campo di velocità istantaneo associato a un eco radar in movimento, mentre finalmente sarà il capitolo intitolato *Il metodo degli analoghi* a introdurre la tecnica di nowcasting rappresentante il fulcro di questo studio. Tuttavia sarà solamente all'interno dei 3 capitoli successivi che si delineeranno le peculiarità della tecnica NACO sviluppata, definendo in primo luogo le generalità dei dati radar a disposizione (capitolo *NACO – I dati radar*), in secondo luogo il metodo di ricerca degli analoghi vero e proprio (capitolo *NACO – Il metodo*), e in terzo luogo conducendo una serie di analisi puntanti a verificare le qualità previsionali – in inglese *forecasting skills* – del nuovo sistema (capitolo *NACO – Le analisi*).

Capitolo 2

La predicibilità

2.1 Introduzione al capitolo

Non è raro, sfogliando articoli scientifici che trattano di previsioni meteorologiche, imbattersi nel vocabolo inglese *predictability*. Fusione delle parole *prediction* e *ability*, questo termine, che in lingua italiana potrebbe essere reso con la parola *predicibilità*, indica la possibilità di poter conoscere anticipatamente qualcosa. Pur potendo trovarsi in contesti non tecnici, in questo capitolo si indagherà la valenza puramente scientifica di questa parola, esplorandone le molteplici sfaccettature e, tramite una breve trattazione matematico-fisica, provando a fornire al lettore un'idea della complessità che permea il concetto di *predicibilità*.

Per lo sviluppo di questo capitolo si è principalmente fatto riferimento all'articolo di Paparella intitolato *Predicibilità, Impredicibilità e Modelli nelle Scienze Naturali*, pubblicato nel 2003 in occasione del Convegno Nazionale *Matematica senza Frontiere* [85].

2.2 Sistemi deterministici e sistemi stocastici

La *predictability*, ovvero l'abilità di predire, è stata considerata per molto tempo una caratteristica fondamentale del metodo scientifico, il quale si basava sulla concezione laplaciana dell'universo secondo cui le leggi della fisica classica siano perfettamente *deterministiche*, e quindi possano prevedere con precisione assoluta l'evoluzione di un sistema fisico.

Al giorno d'oggi si è ben compreso che questa concezione non può più essere sostenuta, e ciò va imputato a due ordini di motivi. In primis, le leggi che regolano l'evoluzione del mondo fisico non sono sempre perfettamente

deterministiche: basti pensare ai fenomeni che avvengono su scala atomica, governati dalla *teoria della meccanica quantistica*, teoria intrinsecamente probabilistica. Questi tipi di sistemi fisici vengono denominati *sistemi stocastici*, e rappresentano un'altra vasta classe di modelli matematici, che si contrappone a quella dei *sistemi deterministici*. In sistemi di questo tipo, l'indeterminazione degli stati futuri è intrinseca al modello, in quanto la conoscenza dello stato del sistema al tempo iniziale riesce a determinare solamente la probabilità che un certo stato si presenti in futuro, senza però riuscire a fornire alcuna certezza.

In secundis, quand'anche si fosse in presenza di sistemi deterministici, si può manifestare il fenomeno della forte *sensibilità alle condizioni iniziali* che introduce, come accennato nel capitolo introduttivo e come verrà dettagliato a breve nel presente capitolo, una forte limitazione pratica alla possibilità di fornire delle previsioni [30].

Allora, di fronte all'assenza di certezze anche per sistemi deterministici, ecco che la quantificazione della *predicibilità* associata a un certo sistema, che sia esso un sistema fisico, biologico, economico o di altro tipo, viene in aiuto al *forecaster* – termine inglese per indicare colui che confeziona *forecasts*, previsioni – con il fine di definire l'orizzonte temporale oltre il quale non ha più senso fornire previsioni.

2.3 Predicibilità nei sistemi deterministici

Accantonando le evidenti limitazioni alla predicibilità prodotte dai sistemi *stocastici* e ponendo invece l'attenzione su problemi prettamente *deterministici*, due sono le caratteristiche matematiche che contraddistinguono questo tipo di problema: le *condizioni iniziali*, definenti lo stato del sistema al tempo iniziale t_0, e alcune leggi che definiscono la sua evoluzione nel tempo, nella maggior parte dei casi espresse sotto forma di *equazioni differenziali*. In quest'ultimo caso, il *determinismo* risiede nel *teorema di esistenza e unicità della soluzione*, valido sotto ipotesi che in genere sono sempre soddisfatte quando si tratta di equazioni differenziali che governano fenomeni fisici[1].

[1] Si tratta del cosiddetto *teorema di esistenza e unicità per un problema di Cauchy*, detto anche *teorema di Picard-Lindelöf*. Questo teorema stabilisce le condizioni di esistenza e unicità della soluzione di un'equazione differenziale ordinaria fornita assieme a delle condizioni iniziali (il cosiddetto *problema di Cauchy*). Il teorema è un valido strumento nello studio delle equazioni differenziali, ma a priori garantisce unicamente l'esistenza della soluzione *localmente*, ossia in un intorno delle condizioni iniziali. Non è assicurata, invece, l'esistenza di un'unica soluzione in un intervallo arbitrario.

Tuttavia, malgrado il determinismo, la predicibilità viene compromessa principalmente per le seguenti tre cause:

1. per quanto gli strumenti osservativi vengano perfezionati, non si potrà mai raggiungere una perfetta conoscenza dello stato iniziale di un sistema;

2. nel calcolo numerico utilizzato per la risoluzione dei sistemi di equazioni differenziali, *arrotondamento numerico* (denominato *errore di round-off*), *algoritmi d'integrazione* e *discretizzazione delle equazioni* costituiscono tre livelli d'introduzione di errore nella soluzione;

3. le leggi che descrivono l'evoluzione temporale del sistema deterministico non sono quasi mai perfettamente note, dando vita a un modello matematico inesatto.

Le previsioni meteorologiche costituiscono un caso lampante di difficoltà di predicibilità. Come già detto nelle pagine precedenti, lo stato dell'atmosfera al generico istante temporale t è descritto da un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali che, per poter essere risolto numericamente, viene opportunamente approssimato. Ma se anche si riuscisse a ovviare ai punti **2** e **3**, riuscendo a integrare le equazioni differenziali senza errori e riuscendo a disporre di un modello perfetto di atmosfera, resterebbe comunque il problema al punto **1**, quello relativo alle *condizioni iniziali*.

2.3.1 L'esempio dell'atmosfera

Infatti, esiste una teoria che spiega come equazioni formalmente deterministiche possano generare soluzioni impredicibili: è la celebre *teoria del caos* (si veda nota[16] a piè di pagina all'interno del capitolo introduttivo). Tuttavia, solo un'interpretazione particolarmente semplicistica dei suoi risultati può far credere che nulla di attendibile possa essere detto sull'evoluzione a lungo termine di un sistema dinamico. Perché molti dei sistemi caratterizzati dall'essere impredicibili nei loro aspetti dettagliati spesso, però, accade che mostrino delle caratteristiche globali il cui andamento può essere estrapolato su periodi medio-lunghi con una certa dose di affidabilità [85]. Caso lampante è quello del sistema atmosferico, che da esito tanto a *previsioni climatologiche* con orizzonte temporale annuale se non secolare, quanto a *previsioni meteorologiche* con orizzonte temporale entro le due settimane. Infatti, da un lato si sente dire, per esempio, che la continua emissione nell'atmosfera di gas serra sta ineluttabilmente provocando un riscaldamento globale i cui disastrosi effetti sono stati previsti fino al 2100, dall'altro lato

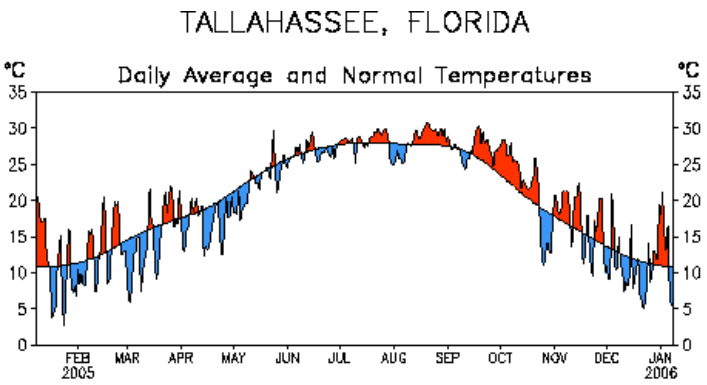


FIGURA 2.1: **Andamento annuale della Temperatura.** Temperatura media giornaliera registrata a Tallahassee dal Gennaio 2005 al Gennaio 2006. La linea nera con andamento regolare rappresenta la *media climatologica*, mentre le aree rosse e blu indicano i periodi in cui la temperatura è stata, rispettivamente, superiore o inferiore a tale media. Si nota che l'errore rispetto alla media climatologica può dirsi entro i $\pm 5°$C.

si sente ripetere che le previsioni meteorologiche tendono ad avere un alto margine di errore non appena si tenta di estenderle a periodi superiori ai due o tre giorni, e che queste diventino del tutto inattendibili se le si fornisce per periodi superiori alle due settimane.

Si tratta del medesimo sistema fisico, l'atmosfera, eppure alcuni aspetti risultano molto più predicibili di altri. Per esempio, in FIGURA 2.1 è riportato l'andamento annuale della temperatura rilevata nella città di Tallahassee, in Florida, dal Gennaio 2005 al Gennaio 2006 [75]. Osservando il grafico si nota che, se si accetta un margine di errore di $\pm 5°$C rispetto alla media climatologica (ed è un margine d'errore ben accettato ad esempio da architetti e ingegneri contestualmente alle loro scelte progettuali su ponti, strade o edifici), l'andamento della temperatura è stato *prevedibilissimo* nel corso dell'intero anno. Perciò, almeno stando alla variazione annuale della temperatura, si potrebbe essere tentati di concludere che gli impredicibili fenomeni meteorologici costituiscano minime fluttuazioni attorno ad andamenti medi (il ciclo annuale delle temperature in questo caso) molto ben determinati. E pur avendo questa affermazione un fondo di verità, il punto chiave di quest'esempio riguarda l'errore: per quantificare la predicibilità di un qualunque fenomeno, è necessario prima stabilire il margine di incertezza entro il quale la previsione può essere considerata utile, ovvero sufficientemente rappresentativa di ciò che effettivamente si verifica nella realtà.

2.3.2 Un modello matematico per la predicibilità

Ecco, quindi, che ha poco senso parlare di fenomeni predicibili o impredicibili *di per sé*: la predicibilità dipende in modo cruciale anche dalla scelta di un certo margine d'errore, e si riprenderà questo concetto tra non molte righe. Prima, però, si tenterà di valutare formalmente la predicibilità di un sistema fisico (oppure di altro tipo, come biologico o economico) tramite la definizione di un modello matematico che lo descriva.

Generalmente il modello può assumere la forma di *sistema dinamico*, costituito dall'insieme Ω di tutti i possibili stati che il sistema può assumere (detto *spazio delle fasi*), e da una regola di evoluzione che determina come lo stato del sistema cambia nel tempo [48]. Per *stato del sistema* si intende un vettore $\mathbf{x}(t)$ contenente in modo ordinato i valori di tutte le variabili usate per descrivere il sistema (nel caso del sistema atmosferico, ad esempio, le variabili contenute nel vettore di stato potranno essere p, T, ϱ, umidità relativa e velocità). La *regola di evoluzione*, invece, è costituita tipicamente da una o più equazioni differenziali ordinarie del tipo

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) \ ,$$

dove $\mathbf{F}$ è una funzione vettoriale tale che l'equazione differenziale appena prospettata soddisfi i criteri per l'esistenza e l'unicità delle soluzioni nel dominio Ω. Poiché un modello matematico siffatto possiede intrinsecamente natura *deterministica*, conoscendo con esattezza infinita lo stato del sistema a un certo istante, le equazioni differenziali determineranno univocamente lo stato del sistema negli istanti successivi. L'impredicibilità dei sistemi dinamici non è perciò insita nei sistemi stessi (come accade invece per i modelli *stocastici*), ma si fonda, come già detto in precedenza, sulla impossibilità di conoscere con *esattezza infinita* le condizioni iniziali del sistema.

Per arrivare al concetto di *predicibilità* relativo a un sistema dinamico, chiamando $\mathbf{x_0}$ il vettore contenente gli stati iniziali del sistema, definiamo *orbita di* $\mathbf{x_0}$ la sequenza temporale degli stati che il sistema assume partendo dalle specifiche condizioni iniziali $\mathbf{x_0}$. Allora la *predicibilità* di un sistema dinamico è riconducibile a quanto velocemente si separano orbite distinte che partono da condizioni iniziali leggermente diverse (si veda la FIGURA 2.2). In particolare, chiamando $\delta(0)$ la separazione iniziale fra le due condizioni iniziali $\mathbf{x_0}$ e $\mathbf{x_0} + \delta(0)$, si trova che la separazione fra le orbite con lo scorrere del tempo, $\delta(t)$, aumenta con andamento esponenziale

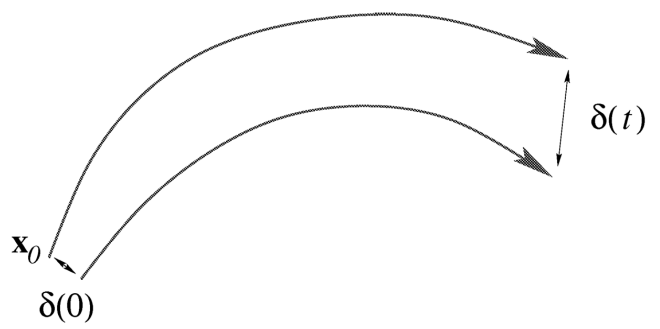


FIGURA 2.2: **Orbite nello spazio delle fasi.** In figura sono rappresentate due orbite nello spazio delle fasi, una originata dalla condizione iniziale $\mathbf{x_0}$ e l'altra originata dalla vicinissima condizione iniziale $\mathbf{x_0} + \delta(0)$. Le proprietà di predicibilità di un sistema dinamico dipendono da quanto rapidamente cresce il $\delta(t)$, ovvero da quanto rapidamente si separano orbite inizialmente vicine nello spazio delle fasi.

del tipo

$$\|\delta(t)\| \approx \|\delta(0)\|\, e^{\lambda t}$$

a patto che si scelgano condizioni iniziali sufficientemente vicine, ovvero un $\delta(0)$ di modulo sufficientemente piccolo, e si abbia a che fare con tempi grandi, al limite tendenti a infinito. L'esponente, oltre a presentare il tempo t, porta un parametro λ chiamato *esponente di Lyapunov*.

2.3.2.1 L'esponente di Lyapunov

Questo esponente, scelto uno specifico sistema dinamico e scelta una precisa zona del dominio Ω, può essere stimato esplicitando λ dalla formula appena scritta, al tendere del tempo a infinito e della separazione iniziale a zero:

$$\lambda = \lim_{\substack{t \to \infty \\ \|\delta(0)\| \to 0}} \frac{1}{t} \ln \frac{\|\delta(t)\|}{\|\delta(0)\|} \ .$$

Finché l'*esponente di Lyapunov* resta negativo, allora $e^{\lambda t} \to 0$ con $t \to \infty$, e le orbite convergono in un unico punto, rendendo predicibile con esattezza lo stato futuro del sistema a partire da condizioni iniziali anche leggermente differenti. Ma quando $\lambda > 0$, allora l'esponenziale tende a infinito con il tempo, e le orbite divergono.

É quest'ultimo il caso più comune per i sistemi dinamici, da cui scaturisce l'*impredicibilità*: il sistema mostra una dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali, per cui un minimo errore di misurazione di queste porterebbe evoluzioni temporali completamente differenti. A ciò consegue che,

poiché come sottolineato più volte non si può misurare sperimentalmente lo stato iniziale di un sistema dinamico con assoluta precisione, ma al più si può dire che esso giace entro una distanza dallo stato misurato pari al margine di errore della misura, l'orbita calcolata a partire dallo stato misurato divergerà esponenzialmente dall'orbita effettivamente seguita dal sistema reale.

2.3.2.2 Il tempo di Lyapunov

L'*esponente di Lyapunov* quantifica la rapidità di questa divergenza, poiché più grande esso è, più velocemente porterà le orbite a divergere. Ma essendo λ dimensionalmente l'inverso di un tempo, tipicamente si fa riferimento all'inverso di questo parametro per definire la predicibilità di un sistema dinamico. Perciò si definisce il *tempo di Lyapunov*,

$$T_\lambda = \frac{1}{\lambda} \ ,$$

e sostituendo questa quantità nella relazione iniziale si ottiene la seguente espressione:

$$\|\delta(t)\| \approx \|\delta(0)\| \, e^{\frac{t}{T_\lambda}} \ .$$

Da questa forma si nota che, nel caso in cui il tempo scorra fino a $t = T_\lambda$, l'esponente diventa unitario, ottenendo

$$\|\delta(t)\| \approx e \cdot \|\delta(0)\| \quad \text{per } t = T_\lambda \ .$$

Poiché il numero di Nepero, approssimato alla seconda cifra decimale, è pari a $e = 2.72$, si può dire che, una volta trascorso un tempo T_λ, la separazione tra le orbite sia quasi triplicata rispetto alla separazione all'istante iniziale. Questo significa che dopo un *tempo di Lyapunov*, l'errore commesso nella previsione è diventato quasi triplo rispetto all'errore commesso nella misura delle condizioni iniziali, rendendo poco affidabile la previsione oltre quel tempo caratteristico. Ecco quindi che questa quantità può essere calcolata sperimentalmente con il fine di essere usata come misura di predicibilità associata a un certo sistema dinamico.

2.3.2.3 Dipendenza dal margine d'incertezza

E, in effetti, nel caso dei più semplici sistemi dinamici che esibiscono dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali, non è errato individuare in T_λ una grandezza che possa quantificare il tempo tipico di predicibilità. Tuttavia,

generalizzare questa visione può essere fuorviante, e l'atmosfera terrestre ne fornisce un controesempio. Infatti, da un lato sappiamo che le previsioni meteorologiche sono sufficientemente affidabili entro orizzonti temporali dell'ordine dei tre giorni, dall'altro si può calcolare che il *tempo di Lyapunov* per l'atmosfera è dell'ordine del secondo. Questa forte discrepanza tra le misure di affidabilità della previsione assomiglia, anche se su orizzonti temporali più piccoli, a quella tra *previsioni meteorologiche* e *previsioni climatologiche* di cui si è parlato poco sopra. Si è ricaduti, cioè, nello stesso paradosso illustrato con l'esempio delle previsioni climatologiche sulle temperature annuali.

La intuitiva spiegazione è solo una, valida per entrambi i casi: il tempo di predicibilità dipende *anche* dal margine di incertezza associato alle misure. Tanto maggiore sarà l'accuratezza associata alla misura dello stato iniziale, tanto più ridotto sarà l'insieme dei possibili stati iniziali reali, tanto minore sarà la divergenza delle orbite seguite da ciascuno di essi, portando a un aumento di predicibilità.

Dopotutto, si era specificato come la relazione $\|\delta(t)\| \approx \|\delta(0)\|\, e^{\lambda t}$ fosse formalmente valida solamente per separazioni iniziali $\delta(0)$ molto piccole, al limite infinitesimali, e per questo motivo il calcolo del T_λ derivante da quella relazione non può considerarsi valido nel caso in cui la separazione iniziale $\delta(0)$, ovvero l'errore di misura dello stato iniziale, sia finito e non infinitesimo. Questo è il caso delle previsioni meteorologiche, nelle quali lo stato atmosferico al tempo t_0 è noto con un errore tutt'altro che infinitesimo.

2.3.2.4 L'esponente di Lyapunov a scala finita

Allora, con il fine di ottenere stime del tempo di predicibilità anche per quei sistemi caratterizzati da separazioni iniziali non infinitesime, il concetto di *esponente di Lyapunov* è stato di recente generalizzato [6], portando alla nascita del cosiddetto *esponente di Lyapunov a scala finita*, λ_δ, individuato dall'acronimo inglese FSLE, *Finite Size Lyapunov Exponent* [17]. Prima di fornirne la definizione occorre introdurre il tempo $T_r(\mathbf{x}, \delta)$, necessario affinché la coppia di orbite aventi come condizioni iniziali gli stati $\mathbf{x_0}$ e $\mathbf{x_0} + \delta$ (con δ questa volta finito e non infinitesimo) sia contraddistinta da una distanza pari a $r\|\delta\|$, dove r è una costante maggiore dell'unità[2]. Con queste premesse, l'esponente di Lyapunov a scala finita, in maniera

[2]Tipicamente r viene scelta pari a due, individuando il tempo $T_2(\mathbf{x}, \delta)$ (detto *tempo di raddoppio*), oppure pari a tre, dando vita al tempo $T_3(\mathbf{x}, \delta)$.

del tutto analoga a quello originale, è così definito:

$$\lambda_\delta = \left\langle \frac{1}{T_r(\mathbf{x}(t), \delta)} \right\rangle \log(r) \ .$$

Le parentesi angolari stanno a indicare una media temporale estesa su di un intervallo di tempo infinito. Da questa definizione del λ_δ, tuttavia, si ottiene un valore numerico che può dipendere dall'orientazione della misurazione del vettore $\boldsymbol{\delta}$. É utile riformulare la definizione imponendo che $\boldsymbol{\delta}$ sia scelto giacente lungo la direzione che massimizza λ_δ. Con questa ulteriore richiesta si può dimostrare che, se il sistema dinamico ammette un *esponente di Lyapunov* positivo, allora l'FSLE tende a quest'ultimo per δ che tende a zero, ovvero, in simboli,

$$\lambda \to \lambda_\delta \quad \text{per} \quad \delta \to 0 \ .$$

Ecco che l'inverso dell'FSLE quantifica il tempo necessario a un sistema dinamico affinché una perturbazione *finita* delle condizioni iniziali, di magnitudine $\|\delta\|$, possa crescere di un fattore r (raddoppiare se $r = 2$, triplicare se $r = 3$ e così via), riuscendo così a quantificare la *predicibilità* tenendo in conto sia della specifica dinamica del sistema in analisi, sia del margine di incertezza $\|\delta\|$ imposto dalla precisione delle misure (oppure scelto dall'osservatore con il fine di simulare delle predicibilità). In più, se il *numero di Nepero* fissava a circa 2.72 il fattore di crescita dell'errore, con l'FSLE scegliendo r può essere scelto quale fattore di crescita dell'errore simulare.

2.3.3 La predicibilità nei sistemi accoppiati

Il λ_δ si rivela particolarmente efficace anche per quantificare la predicibilità di sistemi composti da più sottosistemi accoppiati. Ponendo il caso di un sistema dinamico costituito da due soli sottosistemi accoppiati, il sistema dinamico complessivo sarebbe dominato da due distinte scale temporali, una per sottosistema, rappresentate dall'inverso dell'*esponente di Lyapunov* di ciascun sottosistema, ad esempio λ_f^{-1} e λ_s^{-1}. I due pedici non sono casuali: il primo sta per *fast*, il secondo per *small*, individuando il sottosistema più rapido (e quindi quello più difficilmente prevedibile, con un T_λ piccolo) e quello più lento (e quindi più facilmente prevedibile, con un T_λ grande). Perciò $\lambda_f^{-1} > \lambda_s^{-1}$

Anche se perturbata dalla presenza del sottosistema veloce, ci si aspetta che la dinamica lenta – che poniamo sia descritta dalla variabile x – sia

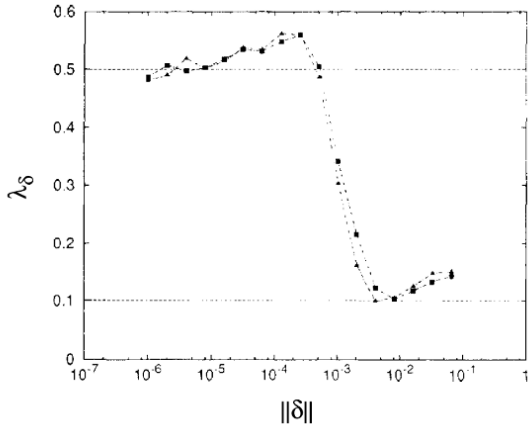


FIGURA 2.3: **FSLE di un sistema dinamico accoppiato.** Questo grafico mostra l'andamento empirico dell'FSLE in funzione dell'incertezza $\|\delta\|$, calcolato utilizzando un sistema fondato su due sottosistemi accoppiati caratterizzati da esponenti di Lyapunov $\lambda_s = 0.1$ Hz e $\lambda_f = 0.5$ Hz. Come si può notare dal grafico, questi due valori sono assunti dall'FSLE rispettivamente per $\|\delta\|$ grandi e per $\|\delta\|$ piccoli. La differenza tra le due curve empiriche sta nel diverso metodo di calcolo delle distanze nello spazio delle fasi: è stato usato il metodo della *norma euclidea* per la curva con i quadrati, e il metodo della *norma assoluta* per la curva con i triangoli.

maggiormente predicibile di quella descritta dalla variabile y. Calcolando, allora, il valore del λ_δ al variare del margine d'incertezza $\|\delta\|$, quello che si nota è che per $\|\delta\|$ piccoli il λ_δ approssima l'esponente di Lyapunov del sottosistema veloce, λ_f, mentre per $\|\delta\|$ grandi accade l'opposto, e il il λ_δ approssima bene l'esponente di Lyapunov del sottosistema lento, λ_s. Questi risultati sono riportati nel grafico in FIGURA 2.3, derivante da uno studio sperimentale su un sistema dinamico costituito da due sottosistemi accoppiati.

Le implicazioni di questi risultati sono piuttosto profonde: in presenza di un sistema dinamico accoppiato, se ci si accontenta di un margine d'incertezza abbastanza grande, i tempi di predicibilità sono determinati dal solo sottosistema lento, mentre il sottosistema veloce assume il ruolo di semplice *rumore* che, in ogni caso, rimane sotto la soglia dell'incertezza sperimentale e non viene quasi percepito. Il contrario, invece, accade se si cerca un margine d'incertezza ridotto.

Ciò suggerisce che, entro margini d'incertezza ampi, l'utilizzo del solo esponente di Lyapunov lento, $\lambda_\delta = \lambda_s$, riesca a rappresentare e prevedere bene la fenomenologia descritta dal sistema dinamico composto da

sottosistemi accoppiati. Perciò ancora una volta emerge l'importanza del *margine d'incertezza* ai fini della determinazione della predicibilità di un sistema dinamico, quand'anche suddivisibile in sottosistemi accoppiati l'uno all'altro.

2.3.4 L'influenza della scala temporale

L'idea che alcuni fenomeni naturali siano caratterizzati da una gerarchia di scale temporali (e spaziali), l'una dentro l'altra come matriosche, si è rivelata particolarmente utile in ambiti nei quali l'analisi teorica trova forti difficoltà, ad esempio in quello della *teoria della turbolenza*. Infatti è sorta nel tempo l'idea che sia possibile mettere a punto modelli semplificati che descrivano una fenomenologia dal punto di vista di un limitato numero di scale. Questo è ciò che succede in tutti i modelli meteorologici numerici: lungi dal descrivere i moti dell'aria fino alle scale più ridotte (dell'ordine del centimetro per la scala spaziale, e del secondo per la scala temporale), la descrizione modellistica vera e propria si ferma tipicamente a scale dell'ordine dei 10 km e della mezz'ora. Tutta la dinamica delle scale più piccole, invece, è racchiusa da delle *parametrizzazioni*, ovvero equazioni semplificate che approssimano la fenomenologia delle piccole scale, pur presentando formalmente una dipendenza esplicita dalle sole variabili *lente*, caratterizzanti le scale superiori.

Se da un lato l'introduzione dell' FSLE fornisce un ulteriore supporto a queste linee di pensiero, avallandone la validità, al contempo costituisce un monito verso la tendenza – sempre più evidente negli ultimi anni – alla eccessiva complicazione dei modelli. Perché è vero che con il continuo aumento della potenza di calcolo è possibile gestire modelli matematici sempre più complicati, con un numero sempre maggiore di variabili e composti da un numero sempre maggiore di sottosistemi distinti e accoppiati, ma allo stesso tempo è pur vero che, se questo sforzo è volto al tentativo di ottenere un sempre maggiore dettaglio tramite l'inclusione esplicita nel modello di scale via via più piccole e veloci, è bene essere coscienti che a esse si associa una progressiva riduzione del tempo di predicibilità. Nel caso meteorologico, l'orizzonte di attendibilità di tre giorni, facilmente raggiungibile quando si parla di fenomeni atmosferici su scala temporale e spaziale di una classica perturbazione (la cosiddetta *mesoscala* meteorologica), si riduce a poche ore se ci si concentra su fenomeni sulla scala di un temporale estivo (la cosiddetta *scala locale*), necessitanti di un maggiore dettaglio e, di conseguenza, caratterizzati da un minore FSLE. Come se non bastasse, non è affatto garantito, per quanto sia intuitivo, che l'inclusione esplicita

delle piccole scale nel modello meteorologico migliori la predicibilità sulle grandi scale: modelli climatici molto dettagliati non sono necessariamente più attendibili di modelli climatici relativamente semplici.

2.3.5 Gli approcci alla predicibilità

Da questa discussione si è compreso quanto sia imprescindibile parlare di *margine d'errore* quando si utilizza il concetto di *predicibilità*, e assieme al margine d'errore parlare di *scala*, temporale e spaziale, associata ai fenomeni da predire. In più, l'FSLE è risultato un buon estimatore della predicibilità per fenomeni la cui dinamica è caratterizzata da più di una scala caratteristica, e quindi potenzialmente da tempi di predicibilità fortemente dipendenti dal margine d'errore.

Tuttavia, con il complicarsi del sistema dinamico in analisi – e si pensi ai tantissimi livelli di complessità del sistema dinamico atmosferico, con aggravio ulteriore aggiungendo il problema della precipitazione –, diventa sempre più difficile studiare con esattezza la predicibilità in modo analitico. Per questo motivo, pur esistendo studi sulla predicibilità atmosferica puramente analitici (si veda ad esempio l'articolo di Martin Ehrendorfer (1994) in cui l'autore tenta di ottenere una valutazione della crescita della preturbazione in un sistema atmosferico attraverso lo studio della *equazione di Liouville* [29]), si deve nella maggior parte dei casi ricorrere a relazioni sperimentali che ne forniscano una stima più o meno vicina al reale [42].

Ma la *predicibilità*, che da un punto di vista puramente dinamico è dovuta alla dipendenza sensibile da parte dalle orbite descritte dagli stati atmosferici nei confronti di piccole perturbazioni nelle condizioni iniziali (circostanza denominata *problema alle condizioni iniziali*), è tuttavia – almeno in parte – riconducibile anche a questioni prettamente pratiche. Infatti, come sottolinea Edward Norton Lorenz (1917–2008) in un articolo del 1973 [64], è impossibile parlare di predicibilità senza relazionarla allo specifico *metodo di previsione* utilizzato per misurarla.

Perché, ponendo per esempio di usare un *metodo numerico* di previsione, e quindi un modello meteorologico, se da un lato è vero che l'*approccio analitico* permette di comprendere all'interno della misura di predicibilità i concetti fondamentali di non linearità, di crescita della perturbazione e di sensibilità alle condizioni iniziali, è pur vero che si cade in ogni sorta di *errore dovuto al modello* nel momento in cui gli studi sulla predicibilità vengono condotti su specifici modelli rappresentativi del reale. Così facendo sorgono errori dovuti alla struttura del particolare modello utilizzato,

alla mancanza di risoluzione adeguata, alle interazioni mal descritta tra le scale spaziali, alla inadeguata parametrizzazione degli effetti sulle piccole scale, alle condizioni al contorno, e a problematiche numeriche e computazionali quali la discretizzazione del continuo e i metodi d'integrazione numerica.

Nella pratica, quindi, risulta difficile distinguere, all'interno del problema della predicibilità, la componente associata agli errori nelle condizioni iniziali dalla componente associata agli errori portati dallo specifico modello usato [81]. É per questo motivo che si parla di misure di predicibilità non solo con *approccio analitico* o con *approccio sperimentale*, ma anche con *approccio al modello*. In quest'ultimo caso, la predicibilità viene calcolata misurando le abilità dello specifico modello numerico nel predire un certo fenomeno atmosferico tramite comparazione con le osservazioni.

Ma non esistono solamente metodi numerici, per cui la predicibilità varia ulteriormente al variare della tipologia di metodo previsionale adottato. Nella sezione che segue verranno analizzati alcuni dei principali metodi di previsione meteorologica a brevissimo termine, già denominata *nowcasting*, provando per alcuni di questi a fornire una misura di predicibilità. La maggior parte di questi metodi sarà impiegata nel presente studio di tesi.

Capitolo 3

I metodi di estrapolazione

3.1 Introduzione al capitolo

Prevedere la precipitazione e anticiparne l'evoluzione è un compito piuttosto difficoltoso. Si tratta di una meteora governata da processi microfisici estremamente complessi, e ancora oggi non è ben chiaro quali siano le circostanze per le quali una nuvola inizi a generare idrometeore. Non solo, perché anche guardando a scale più ampie sorgono grosse difficoltà dovute ai complicati processi dinamici che governano l'atmosfera. Queste difficoltà si riverberano sulle possibilità di prevedere la precipitazione attraverso modelli fisici dell'atmosfera e della precipitazione, limitando la loro accuratezza.

É per tale motivo che in questo capitolo si introdurranno i cosiddetti *metodi di estrapolazione*. Basati sulla predizione di scenari immediatamente futuri a partire da pattern *real time* di echi radar, questi metodi rappresentano un'ottima alternativa ai metodi numerici per la previsione a brevissimo termine della precipitazione. Due sono essenzialmente le filosofie estrapolative: quella basata sulla *persistenza Euleriana*, e quella basata sulla *persistenza Lagrangiana*, entrambe trattate nelle sezioni che seguono.

Per lo sviluppo del presente capitolo si è attinto principalmente dai seguenti articoli: *Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology*, pubblicato nel 2002 da Germann e Zawadzki [41]; *Quantitative Precipitation Forecasts based on radar observations: principles, algorithms and operational systems*, pubblicato nel 2008 da Reyniers [91]; *Using a 10-Year Radar Archive for Nowcasting Precipitation Growth and Decay: A Probabilistic*

Machine Learning Approach, pubblicato nel 2019 da Foresti *et al.* [38]; *Predictability of precipitation from continental radar images. Part V: Growth and decay*, pubblicato nel 2012 da Radhakrishna *et al.* [90].

3.2 Estrapolazione e modelli numerici

Se si punta a ottenere una previsione di pioggia mediante una *corsa* – in lingua inglese *run*, descrivente l'operazione di *far girare* un codice informatico – di un modello numerico previsionale, occorre essere consci del fatto che il calcolo della precipitazione rappresenti un prodotto indiretto dei modelli numerici, ottenuto a posteriori sulla base di una piuttosto cruda *parametrizzazione* della fisica della convezione e della microfisica che governano la formazione e la disintegrazione delle gocce di pioggia. Questo compromette fortemente l'affidabilità dei modelli numerici quando si tratta di prevedere fenomeni piovosi. E, difatti, in letteratura specialistica sono presenti pochissimi studi sulla predicibilità della precipitazione ottenuta mediante modelli numerici.

In più, se alle volte i fenomeni di precipitazione possono trovarsi a coprire aree enormi, come nel caso del lento passaggio di un fronte caldo, è altrettanto frequente che la precipitazione possa essere un fenomeno fortemente localizzato, come nel caso di un evento convettivo isolato agente su scale molto più piccole della classica *mesoscala* meteorologica, fino in certi casi a coprire scale inferiori perfino alla risoluzione spaziale dei modelli numerici più recenti.

Perciò, soprattutto per questi due ordini di motivi le previsioni di pioggia tramite modelli numerici – indicate, in lingua inglese, con l'acronimo NWP, ovvero *Numerical Weather Predictions* – risultano, stando agli attuali modelli numerici, piuttosto imprecise nel momento in cui vengono fornite per aree limitate.

In aggiunta, come già sottolineato nei capitoli precedenti, l'assimilazione di *condizioni iniziali* non del tutto esatte al momento dell'inizializzazione del modello numerico può portare a previsioni fortemente sbagliate per le primissime ore.

Queste forti limitazioni dei modelli NWP nella previsione piovosa a brevissimo termine su aree ristrette ha spinto negli anni la comunità scientifica a elaborare metodologie di tipo diverso per il *nowcasting*, che tipicamente è finalizzato all'ottenimento di previsioni quantitative di pioggia con anticipo di poche ore (quelle che in lingua inglese sono dette *Quantitative Precipitation Forecasts* e vengono indicate con l'acronimo QPFs). L'idea è stata

quella di sfruttare le osservazioni da radar meteorologico per estrapolare previsioni a brevissimo termine.

Infatti l'osservazione tramite radar produce mappe di precipitazione ad alta risoluzione temporale (5 minuti tipicamente) e spaziale (anche fino a 500 m), rendendosi ideale per la previsione di eventi piovosi su piccola scala con un'ottima frequenza di campionamento dati. L'idea dietro un QPF basato su immagini radar real-time consiste nell'*estrapolazione* spazio-temporale delle aree di precipitazione a partire dalle osservazioni radar note.

Le modalità con cui condurre questa estrapolazione sono diverse, e nella letteratura specialistica continuano a svilupparsene di continuo, ma ci sono alcuni principi fondamentali che costituiscono le tecniche più semplici, e che al contempo fanno da base per quelle più sofisticate [91]. Sono queste tecniche di base che si andranno ad analizzare nel presente capitolo: l'estrapolazione da radar basata sulla *persistenza Euleriana*, e quella basata sulla *persistenza Lagrangiana*, assieme a possibili modifiche di quest'ultima.

3.3 La Persistenza Euleriana

Parlando di previsioni a partire da echi radar di precipitazione, l'approccio senza dubbio più semplice che si possa pensare consiste nel *congelare nel tempo* l'osservazione radar più recente, riproponendola uguale a sé stessa nell'immediato futuro. La previsione coincide così con l'ultimo eco radar rilevato, e la bontà di essa dipende da quanto stazionaria sia la perturbazione osservata. Questa tecnica di estrapolazione viene denominata in letteratura scientifica *persistenza Euleriana* (in lingua inglese *Eulerian persistence*).

Per quanto operativamente semplice questa tecnica sia, si schematizza la sequenza di operazioni da compiere per pervenire a una previsione basata sulla *persistenza Euleriana*, in modo tale da poter fare un raffronto, in seguito, con la più evoluta tecnica basata sulla *persistenza Lagrangiana*:

1. Si recupera l'ultima osservazione radar disponibile, che sarà pressoché *real-time*. Lei costituisce l'eco radar al tempo t_0;

2. Si eleva quest'osservazione al rango di *previsione*, valida per le successive decine di minuti, sino al raggiungimento del *lead time* τ;

3. A posteriori, trascorso il *lead time*, si confronta la previsione con le osservazioni, decretandone l'abilità previsionale.

Nei paragrafi che seguono s'introdurrà la *persistenza Euleriana* dal punto di vista matematico attraverso una relazione puntuale prima e un'equazione differenziale poi, concludendo con il parlare della predicibilità associata a questo metodo d'estrapolazione.

3.3.1 La relazione della persistenza Euleriana

Chiamando $\mathbf{\Psi}$ il campo di precipitazione *osservato*, e trasformandolo in campo di precipitazione *previsto* tramite l'aggiunta di un accento circonflesso, $\hat{\mathbf{\Psi}}$, formalmente la persistenza Euleriana può esprimersi per mezzo della seguente relazione:

$$\hat{\mathbf{\Psi}}(t_0 + \tau, \mathbf{x}) = \mathbf{\Psi}(t_0, \mathbf{x}) \ , \tag{3.1}$$

dove t_0 rappresenta il tempo d'inizio previsione, per il quale dispongo di osservazioni, $\mathbf{x}$ è il vettore che identifica la posizione spaziale, e τ è il cosiddetto *lead time*, ovvero il corrispondente inglese dell'*orizzonte temporale* per il quale si sta fornendo una previsione [41]. La relazione, perciò, comunica che, scelto un punto $\mathbf{x}$ dello spazio al tempo t_0, la previsione $\hat{\mathbf{\Psi}}$ in quello stesso punto ma in un istante futuro, lontano τ dall'istante iniziale t_0, coincide esattamente con l'osservazione $\mathbf{\Psi}$ fatta al tempo iniziale t_0.

Si nota che il generico campo vettoriale $\mathbf{\Psi}$ può portare dentro di sé diverse tipologie di variabili di campo atmosferiche, virtualmente qualsiasi, ammesso che i metodi estrapolativi che si stanno per dettagliare possano essere dei ragionevoli metodi di previsione per la variabile scelta [41]. Ad esempio, l'intensità di pioggia, la quantità di acqua liquida precipitata, la quantità di acqua liquida nella nube, il vapore acqueo, la concentrazione degli aerosol atmosferici, e addirittura la temperatura atmosferica (se si sottrae il contributo di riscaldamento dovuto alla radiazione solare) sono dei possibili candidati. Tuttavia, dal punto di vista pratico, occorre scegliere una variabile atmosferica che, oltre a essere direttamente legata alla precipitazione, possa anche misurarsi su un ampio dominio a una risoluzione spaziale e temporale sufficientemente elevata. Ecco, perciò, che la scelta ricade sulla *riflettività radar*, variabile che asseconda le necessità dette. Quanto al dubbio sul se utilizzare direttamente la *riflettività radar* in forma logaritmica (in lingua inglese chiamata *logarithmic reflectivity*), misurata in [dBZ] e indicata con la lettera Z [38], oppure una quantità da essa derivata come l'*intensità di pioggia* (in lingua inglese chiamata *rainfall rate*, o più brevemente *rain rate*), misurata in [mm/h] e indicata con la lettera R, si tratta di un dubbio lecito, in quanto se è vero che per

certe operazioni è indifferente l'uso dell'una o dell'altra (ad esempio per il calcolo di alcuni *skill-score* per verificare la bontà della previsione), in certe altre il risultato cambia leggermente (ad esempio – facendo un elenco di operazioni che si dettaglieranno in seguito – nel calcolo del campo di moto associato a un certo eco radar, oppure nell'interpolazione condotta negli schemi di avvezione, oppure ancora nella determinazione della correlazione tra previsioni e osservazioni). Per adesso, perciò, si continuerà a utilizzare la generica variabile di campo $\mathbf{\Psi}$, anticipando che presto verrà però sostituita dalla *riflettività radar* Z, in quanto grandezza direttamente misurata dallo strumento osservativo e non derivata.

Tornando all'equazione (3.1), questa relazione, valida per qualsiasi punto $\mathbf{x}$ del dominio Ω, comunica perciò la coincidenza della previsione con l'osservazione, tenuta *congelata* per l'intero *lead time*. Si tratta di un metodo di previsione piuttosto elementare, ma che in certi casi può risultare, in termini di qualità di previsione, al pari se non migliore di altri metodi d'estrapolazione più complessi. Tuttavia, il più delle volte viene utilizzato semplicemente per ottenere una *previsione di riferimento*: le abilità di predizione di altri metodi più sofisticati vengono quantificate tramite il confronto con i risultati della persistenza Euleriana [91].

3.3.2 L'equazione differenziale

A questo punto, per riscrivere l'equazione (3.1) della persistenza Euleriana in forma differenziale si utilizza la definizione di *derivata Lagrangiana*, anche detta *derivata materiale*. La *derivata Lagrangiana* di una certa quantità scalare, indicata matematicamente con la derivata totale $\frac{D}{Dt}(\cdot)$, è, per definizione, pari alla *derivata Euleriana* – anche detta *derivata locale* – di quella stessa quantità, matematicamente corrispondente alla derivata parziale $\frac{\partial}{\partial t}(\cdot)$, sommata a un *termine avvettivo* dato dal prodotto scalare tra vettore velocità e gradiente della quantità, $\mathbf{v}\cdot\nabla(\cdot)$[1]. Perciò, nella visione d'insieme, risulta la seguente relazione tra derivata Lagrangiana e derivata Euleriana:

$$\underbrace{\frac{D}{Dt}(\cdot)}_{\text{derivata totale}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\cdot)}_{\text{derivata locale}} + \underbrace{\mathbf{v}\cdot\nabla(\cdot)}_{\text{termine avvettivo}} . \tag{3.2}$$

[1]Invece, nel caso di quantità vettoriale, per esempio tridimensionale, il termine avvettivo, che deve fornire una tripletta, è costituito dal prodotto matriciale tra il vettore velocità e il gradiente della quantità vettoriale (quest'ultimo è detto *derivata covariante* e fornisce un tensore), per cui formalmente l'operazione di derivata Lagrangiana resta la medesima.

Pensando che il campo vettoriale $\mathbf{\Psi}$ contenga una sola variabile scalare (Z oppure R), lo si può scrivere come generico campo scalare Ψ, e la sua *derivata Lagrangiana* è la seguente:

$$\frac{D\Psi}{Dt} = \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \Psi \ . \tag{3.3}$$

Poiché il campo di moto che si userà sarà bidimensionale, il vettore velocità $\mathbf{v}(x, y)$ comprende solamente le due componenti di velocità nel piano orizzontale, $u(x, y)$ lungo x e $v(x, y)$ lungo y:

$$\mathbf{v}(x, y) = \left\{ \begin{array}{c} u(x, y) \\ v(x, y) \end{array} \right\} \ .$$

Inserendo questo campo di velocità nell'equazione (3.3), con $\mathbf{x} = (x, y)$, si ottiene la seguente relazione:

$$\frac{D\Psi}{Dt} = \frac{\partial \Psi}{\partial t} + u \frac{\partial \Psi}{\partial x} + v \frac{\partial \Psi}{\partial y} \ . \tag{3.4}$$

Nel caso della *persistenza Euleriana*, poiché a parità di coordinata spaziale $\mathbf{x}(x, y)$ il valore di Ψ non si modifica nel tempo, matematicamente ciò si traduce nell'imporre che la derivata Euleriana si annulli, ovvero

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = 0 \ .$$

Con questo vincolo, l'equazione (3.4) perde un termine, e si semplifica nel modo che segue:

$$\frac{D\Psi}{Dt} = u \frac{\partial \Psi}{\partial x} + v \frac{\partial \Psi}{\partial y} = \mathbf{v} \cdot \nabla \Psi \ .$$

L'equazione appena ottenuta è colei che governa la *persistenza Euleriana*: il membro di sinistra, contenente la variazione di Ψ nel tempo seguendo una certa particella d'aria in movimento, si uguaglia al solo termine avvettivo, e ciò significa che variazioni di Ψ nel tempo possono ottenersi, all'interno della particella, esclusivamente se ci si sposta in un'altra zona dello spazio, con caratteristiche di Ψ differenti. Perché finché si resta in una certa zona dello spazio, non si vedrà mai nessuna variazione di Ψ, in quanto il campo Ψ non subisce modifiche nel tempo: lo dice la derivata Euleriana nulla, $\frac{\partial \Psi}{\partial t} = 0$. Ma quando la particella si lascia spostare dalla velocità della corrente $\mathbf{v}$, allora esplora nuove zone, trovando una distribuzione di Ψ differente, con conseguente variazione della Ψ complessiva contenuta nella

particella, rendendo la derivata Lagrangiana non nulla:

$$\frac{D\Psi}{Dt} \neq 0 \quad \text{per } \mathbf{v} \neq 0 \ .$$

Perciò, in definitiva, in assenza di velocità del fluido atmosferico, $\mathbf{v} = 0$ e cade quell'unica possibilità d'incontrare variazioni di Ψ all'interno della particella, immobile in un certo punto, in quanto il campo Ψ che essa vede resta inevitabilmente uguale a sé stesso con lo scorrere del tempo. É per questo motivo che parlare di *metodo di persistenza Euleriana* equivale a considerare un campo di Ψ inalterato nel tempo a fissata regione dello spazio su cui si intende condurre la previsione.

3.3.3 Predicibilità della persistenza Euleriana

Volendo quantificare la *predicibilità* atmosferica ad assegnato metodo di previsione, questa può definirsi come il tempo entro il quale quel metodo riesce a mantenere delle abilità di predizione *utili*, ovvero sufficientemente degne di affidabilità [65].

Per ottenere una misura di *predicibilità* associata al metodo di *persistenza Euleriana* (e valida anche per il metodo di persistenza Lagrangiana), occorre prima di tutto correlare il campo osservato $\Psi(x, y, t)$ con il campo previsto $\hat{\Psi}(x, y, t)$ all'interno del dominio spaziale Ω. La *funzione di correlazione* che può utilizzarsi, sviluppata nel 1973 da Zawadzki [118] [119], è la seguente:

$$c(\tau) = \frac{\displaystyle\int_\Omega \Big(\hat{\Psi}(t_0 + \tau, \mathbf{x})\, \Psi(t_0 + \tau, \mathbf{x})\Big)\, d\mathbf{x}}{\sqrt{\displaystyle\int_\Omega \hat{\Psi}^2(t_0 + \tau, \mathbf{x})\, d\mathbf{x} \int_\Omega \Psi^2(t_0 + \tau, \mathbf{x})\, d\mathbf{x}}} \ .$$

Se i campi $\Psi(x, y, t)$ e $\hat{\Psi}(x, y, t)$ sono identici in un determinato istante di previsione τ, e quindi la previsione è perfetta, allora la funzione di correlazione $c(\tau) = 1$, ed è immediato verificarlo. Invece, più la previsione si discosta dall'osservazione, più la funzione $c(\tau) \to 0$.

Se la $c(\tau)$ dal canto suo permette di determinare la correlazione tra previsione e osservazione a un preciso istante temporale τ, integrandola nel tempo si può sommare la correlazione che si ha per ogni istante temporale, ottenendo un numero tanto più elevato quanto migliore risulta la previsione nel tempo. Se la previsione peggiora rapidamente, $c(\tau)$ decresce rapidamente, e di conseguenza l'integrale fornisce un valore piccolo. Perciò

ecco che l'integrale della $c(\tau)$ misura la bontà della previsione che si sta utilizzando, e di conseguenza fornisce una stima della predicibilità. Nello specifico, si definisce

$$L = \int_0^\infty c(\tau)\, d\tau$$

l'integrale nel tempo della correlazione. Questa grandezza, che possiede la dimensione di un tempo, viene chiamata *tempo di decorrelazione* – in lingua inglese *decorrelation time*, anche detto *lifetime* –, e fornisce una misura qualitativa del tempo dopo cui la previsione si decorrela fortemente dalle osservazioni, perdendo qualsiasi velleità di pronostico.

Nel caso in cui $c(\tau)$ segua una legge esponenziale, allora L rappresenta la costante posta all'esponente della funzione esponenziale, e di conseguenza rappresenta il tempo arrivato il quale la correlazione è scesa fino al valore di $\frac{1}{e} \simeq 0.37$. Questo suggerisce che parlando di L si parla nient'altro che del *tempo di Lyapunov* T_λ, in quanto quel tempo rappresentava l'istante al quale l'errore (ovvero la nostra decorrelazione) diventava e–volte l'errore iniziale (ovvero $\frac{1}{e}$ volte la correlazione massima pari a 1). Questo è valido, tuttavia, solamente nel caso di funzione di correlazione che segua un andamento esponenziale, del tipo

$$c(\tau) \sim e^{-\frac{t}{L}} \ ,$$

con $c(\tau)$ che quindi può vedersi, in termini di errore $\|\delta\|$, come misura della crescita della separazione iniziale, ovvero

$$c(\tau) \sim \frac{\|\delta(\tau)\|}{\|\delta(0)\|} \ .$$

3.4 La Persistenza Lagrangiana

Al contrario della *persistenza Euleriana*, il metodo di estrapolazione fondato sulla *persistenza Lagrangiana* non mantiene inalterato il pattern dell'eco radar nel tempo, eleggendolo a previsione, ma lo sposta nello spazio secondo il campo di moto istantaneo. Si tratta senza dubbio di un metodo di estrapolazione più evoluto rispetto a quello basato sulla *persistenza Euleriana*, ma non sarà privo di fonti d'errore.

Come fatto per la *persistenza Euleriana*, si schematizza qui di seguito la sequenza di operazioni da compiere al fine di pervenire a una previsione basata sulla *persistenza Lagrangiana*:

1. Si recupera l'ultima osservazione radar disponibile, che sarà pressoché *real-time*. Lei costituisce l'eco radar al tempo t_0;

2. Insieme a essa, si recuperano anche alcune osservazioni radar che la precedono, al tempo $t < t_0$;

3. Si utilizzano queste ultime, assieme a quella al tempo t_0, per stimare il *campo di moto* dell'eco radar;

4. Si *avvette*[2] l'eco radar associato al tempo t_0 secondo il campo di moto calcolato;

5. Si perviene a una sequenza di echi radar estrapolati tramite avvezione sino al *lead time* τ. Questi echi costituiscono la *previsione*;

6. A posteriori, trascorso il *lead time*, si confronta la previsione con le osservazioni, decretandone l'abilità previsionale.

Si nota che, rispetto alla procedura associata alla *persistenza Euleriana*, con cui sono condivise solamente la prima e l'ultima operazione, la sequenza di passi da compiere è decisamente più ampia, oltre che notevolmente più provante. Il calcolo del campo di moto con il fine di *spostare* il pattern radar iniziale costituisce la maggiore sfida.

Nei paragrafi che seguono si descriverà il metodo dal punto di vista matematico mediante prima una relazione puntuale e poi un'equazione differenziale, come fatto per la precedente sezione. Successivamente si delineerà il problema del calcolo del campo di moto, lasciandone l'approfondimento a un capitolo dedicato, per poi parlare delle tecniche di *avvezione* dell'eco radar. Infine, si concluderà parlando di predicibilità associata alla *persistenza Lagrangiana*.

3.4.1 La relazione della persistenza Lagrangiana

Se nel caso della *persistenza Euleriana* ciò che *persisteva* era la grandezza Ψ nel tempo a *fissato punto dello spazio* $\mathbf{x} = (x, y)$, concetto che si traduceva matematicamente nel porre la derivata Euleriana a zero,

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = 0 \ ,$$

[2]Questo termine, su cui si tornerà nel seguito con un approfondimento dedicato, evoca lo spostamento nel piano orizzontale dei pixel che costituiscono l'eco radar.

per la *persistenza Lagrangiana*, invece, ciò che *persiste* è sempre la grandezza Ψ nel tempo, ma *non* a fissato punto dello spazio, bensì calcolata nel suo moto assieme alla particella fluida. Ovvero, se la persistenza Euleriana creava il *forecast* – termine inglese per indicare la *previsione* – riproponendo il pattern radar osservato al tempo t_0 identico a sé stesso per i successivi istanti temporali, la *persistenza Lagrangiana*, invece, considera che il generico campo vettoriale $\mathbf{\Psi}$ venga trasportato nello spazio dal campo di velocità $\mathbf{v} = (u, v)$ proprio del fluido, e a causa del trasporto si assista alla continua variazione di $\mathbf{\Psi}$ a fissato punto dello spazio $\mathbf{x} = (x, y)$. In altri termini, se la *persistenza Euleriana* assume persistenza del campo $\mathbf{\Psi}$ nelle coordinate spaziali ancorate a Terra, la *persistenza Lagrangiana* l'assume invece nelle coordinate che si muovono assieme alla perturbazione piovosa [118].

La relazione che lega campo osservato $\mathbf{\Psi}$ e campo previsto $\hat{\mathbf{\Psi}}$ nel metodo di *persistenza Lagrangiana* si modifica, perciò, nel seguente modo rispetto alla relazione (3.1) valida per la persistenza Euleriana:

$$\hat{\mathbf{\Psi}}(t_0 + \tau,\, \mathbf{x}) = \mathbf{\Psi}(t_0,\, \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}) \ . \tag{3.5}$$

Si nota che l'unica modifica consiste nell'aggiunta di un *vettore spostamento* $\boldsymbol{\alpha}$ al secondo membro. Questo sta a significare che la previsione $\hat{\mathbf{\Psi}}$ in un certo punto dello spazio $\mathbf{x}$ non coinvolge il corrispondente valore osservato un tempo τ prima *nello stesso punto* $\mathbf{x}$, ma coinvolge un valore osservato sempre un tempo τ prima, ma in un diverso punto $(\mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha})$, spostatosi del vettore $\boldsymbol{\alpha}$ rispetto al punto iniziale. Poiché lo spostamento dipende dall'entità del campo di velocità, lo si può esprimere genericamente in questo modo [38]:

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{v} \cdot \tau = (u, v)\, \tau \ .$$

3.4.2 L'equazione differenziale

Per ottenere un'equazione in forma differenziale valida per il caso di *persistenza Lagrangiana*, è sufficiente partire nuovamente dall'equazione (3.3) che definisce la *derivata totale* per il campo scalare Ψ, ma questa volta imporre l'annullamento non della *derivata Euleriana* (questa volta il campo si muove assieme al flusso atmosferico, e i valori di Ψ a fissato punto dello spazio si modificano), bensì della *derivata Lagrangiana*:

$$\underbrace{\frac{D\Psi}{Dt}}_{0} = \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \Psi \ . \tag{3.6}$$

Il motivo sta nell'idea che, considerando una particella fluida, questa si muova sotto l'azione dei venti atmosferici, ma al suo interno mantenga costante il valore della grandezza Ψ. Questo permette di vedere le singole particelle d'aria come entità chiuse che, sospinte dal campo di velocità, trasportano in lungo e in largo le grandezze fisiche che le caratterizzano. Matematicamente, ciò si traduce appunto nell'imporre che la derivata totale del campo Ψ sia nulla:

$$\frac{D\Psi}{Dt} = 0 \ .$$

Così facendo, l'equazione (3.6) si semplifica, ed esplicitando la derivata locale di Ψ si ottiene

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\mathbf{v}\cdot\nabla\Psi \ . \tag{3.7}$$

Questa relazione sottolinea come, a differenza di quel che accadeva nella *persistenza Euleriana*, le variazioni di Ψ nel tempo a fissato punto dello spazio non sono nulle, e dipendono esclusivamente dal trasporto di Ψ operato dal *termine avvettivo* $\mathbf{v}\cdot\nabla\Psi$. Nel caso in cui, però, il campo di moto sia nullo anch'esso, allora tutto staziona, e non c'è possibilità per Ψ di modificarsi.

Un altro modo per arrivare all'equazione (3.7) consiste, una volta assunta la *conservazione* della grandezza scalare Ψ seguendo il moto di una particella, nell'utilizzare l'*equazione di conservazione* su di essa. Scrivendo, perciò, quest'ultima in forma differenziale per il campo scalare Ψ,

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \nabla\cdot(\Psi\,\mathbf{v}) = 0 \ ,$$

e svolgendo l'operazione di divergenza, si giunge alla forma che segue:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \Psi\,\nabla\cdot\mathbf{v} + \mathbf{v}\cdot\nabla\Psi = 0 \ .$$

Considerando *incomprimibile* il fluido atmosferico[3], o perlomeno trascurando il termine portante la compressibilità $\Psi\,\nabla\cdot\mathbf{v}$, la relazione si semplifica:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \mathbf{v}\cdot\nabla\Psi = 0 \ .$$

Ecco ottenuta ancora una volta l'equazione (3.7), questa volta evocan-

[3]Per un fluido *incomprimibile*, il campo di velocità soddisfa la condizione $\nabla\cdot\mathbf{v} = 0$. In questo caso, il campo di velocità viene detto *solenoidale*.

do l'*equazione di conservazione* – anche detta *equazione di continuità* – in virtù della conservazione, in termini lagrangiani, della grandezza Ψ al muoversi della particella d'aria.

3.4.3 La discretizzazione dell'equazione differenziale

Nella pratica, avendo a che fare con frame relativi a tempi discreti, per procedere alla risoluzione numerica dell'equazione appena ottenuta occorre innanzitutto *discretizzarla.* Prima di poterlo fare, si scrive quest'ultima in forma estesa, sapendo che $\mathbf{v} = (u, v)$, e si ottiene

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + u\frac{\partial \Psi}{\partial x} + v\frac{\partial \Psi}{\partial y} = 0 \ . \tag{3.8}$$

Utilizzando le variazioni discrete spaziali Δx e Δy e quella temporale Δt, e considerando di conseguenza una variazione finita della generica grandezza di campo Ψ, l'equazione (3.8) discretizzata risulta la seguente:

$$\frac{\Delta \Psi}{\Delta t} + u\frac{\Delta \Psi}{\Delta x} + v\frac{\Delta \Psi}{\Delta y} = 0 \ . \tag{3.9}$$

Quest'equazione può scriversi per ogni singolo istante temporale discreto considerato, perciò se si indica con il pedice n il generico istante n-esimo, l'equazione (3.9) può riscriversi con Ψ_n al posto di Ψ, valore della grandezza di campo allo specifico tempo n-esimo:

$$\frac{\Delta \Psi_n}{\Delta t} + U\frac{\Delta \Psi_n}{\Delta x} + V\frac{\Delta \Psi_n}{\Delta y} = 0 \ . \tag{3.10}$$

Si sono scritte le componenti della velocità in maiuscolo, (U, V), poiché quello che si otterrà sarà un campo di moto *medio*, basato su due frame discreti. Inoltre si nota che, se dal canto loro le derivate

$$\frac{\Delta \Psi_n}{\Delta x} \quad \text{e} \quad \frac{\Delta \Psi_n}{\Delta y}$$

sono calcolate sull'immagine all'istante temporale n, la derivata $\frac{\Delta \Psi_n}{\Delta t}$ è invece calcolata utilizzando gli istanti n e $n-1$.

3.4.4 Il calcolo del campo di moto

Dopo aver ottenuto l'equazione della *persistenza Lagrangiana* in forma differenziale e dopo averla discretizzata, per addentrarsi nello specifico problema della previsione dei campi di precipitazione si procede alla sostituzione

del generico campo scalare Ψ con una grandezza concernente la pioggia. Come già detto nella sezione intitolata *La Persistenza Euleriana*, può utilizzarsi tanto Z, *riflettività radar*, misurata in [dBZ], quanto R, *intensità di pioggia*, misurata in [mm/h]. Poiché, nel caso in cui lo strumento di osservazione sia il solo radar meteorologico (come accadrà nel caso del presente studio), la seconda grandezza scaturisce dalla prima mediante l'uso di una relazione di conversione, si sceglie di utilizzare direttamente la variabile primitiva[4], Z, ottenendo a seguito della sua sostituzione al posto della Ψ l'equazione che segue:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla Z = 0 \ . \tag{3.11}$$

In quest'equazione, il campo Z è noto, al tempo t_0 e ai tempi a lui precedenti, in quanto rappresenta la grandezza direttamente ottenuta da un eco radar. Non è noto, invece, il campo di velocità $\mathbf{v}(x, y)$, che dunque va calcolato. E tuttavia, avendo a disposizione una sola equazione nelle due incognite (u, v), è necessaria un'altra equazione che renda *determinato* il problema, consentendo l'ottenimento del campo delle velocità.

Si rimanda al capitolo successivo per la risoluzione di questo problema, e per una descrizione delle metodologie sviluppate in letteratura scientifica con il fine di ottenere il campo delle velocità a partire dall'equazione (3.11). Equazione che, in ambito non solamente meteorologico, viene chiamata *equazione del flusso ottico* (in lingua inglese, *optical flow equation*, dicitura che spesso è utilizzata anche in italiano mescolando le due lingue, e dando vita alla denominazione *equazione dell'optical flow*).

Di qui in avanti, perciò, si assumerà di essere riusciti a ottenere il campo $\mathbf{v} = (u, v)$, e si descriverà come poter operare la restante operazione: spostare il pattern dell'eco radar secondo il campo di velocità ottenuto.

3.4.5 L'avvezione dell'eco radar

Lasciando al capitolo successivo la descrizione dei metodi di calcolo del campo di velocità $\mathbf{v} = (u, v)$ associato all'eco radar al tempo t_0 – campo che verrà calcolato esclusivamente sulla base delle informazioni ricavate nell'intervallo temporale $\hat{t} \leq t \leq t_0$, antecedente al tempo di riferimento

[4] Germann e Zawadzki [41] scelgono di utilizzare la riflettività radar in forma logaritmica piuttosto che l'intensità di pioggia da essa derivata tramite relazione di conversione, per altri due ordini di motivi: in primis, la *riflettività logaritmica* mantiene la qualità delle osservazioni condotte dai radar meteorologici, mentre invece la conversione in *intensità di pioggia* lascia che alcune informazioni si perdano; in secundis, lavorare in scala logaritmica permette una migliore gestione degli errori relativi, spesso di maggiore importanza rispetto agli errori assoluti.

t_0, e definente quella che viene chiamata *assimilation window* –, si prosegue direttamente alla fase successiva, assumendo di conoscere il valore del vettore $\mathbf{v}$ per ogni singolo pixel dell'immagine radar al tempo t_0. A questo punto occorre *spostare* ciascun pixel secondo il campo di velocità, operazione che, in termini tecnici, viene chiamata *avvezione* del campo piovoso. Nel paragrafo che segue si condurrà un brevissimo approfondimento del termine.

Avvezione

Il termine *avvezione* – in lingua inglese *advection* – identifica, secondo la definizione fornita dal *Glossary of Meteorology* della American Meteorological Society [46], il processo di trasporto di una proprietà atmosferica *esclusivamente* attraverso lo spostamento di massa. Ciò significa che una massa d'aria che, muovendosi, trasporta con sé la sua energia termica, fa *avvezione* dell'energia termica, ma se avviene spostamento di energia termica secondo altri meccanismi che non coinvolgano lo spostamento di masse d'aria, allora non si tratta più di *avvezione* (l'*irraggiamento*, ad esempio, produce scambio di energia termica senza che questa venga fisicamente trasportata da masse fluide).
A livello matematico, l'*avvezione* è espressa, come sottolineato qualche pagina fa nell'equazione (3.2), dal prodotto scalare tra il campo di moto che produce avvezione, e il gradiente della grandezza che la subisce:

$$\text{Termine Avvettivo:} \quad \mathbf{v}\cdot\nabla\Psi \ .$$

In coordinate cartesiane tridimensionali, questo termine può svilupparsi in questo modo,

$$\text{Termine Avvettivo:} \quad u\frac{\partial\Psi}{\partial x} + v\frac{\partial\Psi}{\partial y} + w\frac{\partial\Psi}{\partial z} \ ,$$

con (u, v, w) che rappresentano, rispettivamente, le componenti del vettore vento in direzione Est, Nord e Zenit. I primi due termini producono la cosiddetta *avvezione orizzontale*, mentre invece il terzo termine crea *avvezione verticale*, supposta nulla o quantomeno trascurabile nello sviluppo bidimensionale delle relazioni nelle pagine precedenti.
L'*avvezione*, inoltre, in ambito meteorologico si distingue dalla *convezione*, mentre spesso in altri ambiti scientifici i due termini vengono usati indistintamente. Infatti, stando sempre al *Glossary of Meteorology* [46], l'*avvezione* indica i moti atmosferici su larga scala prevalentemente orizzontali, mentre la *convezione* identifica moti atmosferici su scala locale e prevalentemente a sviluppo verticale. I moti convettivi, a differenza di quelli avvettivi, sono indotti dall'azione dei gradienti termici verticali, abbinata a quella della forza di gravità.

Dopo il breve excursus attorno al termine *avvezione*, riprendendo il filo del discorso, occorre operare l'*avvezione* – ovvero, in questo caso, lo *spo-*

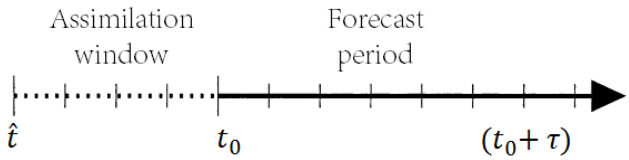


FIGURA 3.1: ***Assimilation window* e *forecast period*.** In figura sono mostrate le due finestre temporali coinvolte nell'*estrapolazione Lagrangiana*. A sinistra, prima del tempo di riferimento t_0, la cosiddetta *finestra di assimilazione* consente il calcolo del campo di moto associato all'eco radar, mentre a destra, oltre il tempo t_0, si entra nel *periodo previsionale*, quell'intervallo temporale all'interno del quale s'intende fornire previsioni.

stamento orizzontale – del campo di pioggia, rappresentato dal campo di riflettività radar al tempo t_0, secondo il campo di moto rappresentato dai vettori $\mathbf{v}$, uno per ogni singolo pixel dell'eco radar. L'avvezione genererà una previsione all'interno del *forecast period*, quella finestra temporale che segue l'*assimilation window*, partendo dal tempo di riferimento t_0 e spostandosi in avanti del *lead time* τ, arrivando sino al tempo $(t_0+\tau)$ (si veda la FIGURA 3.1).

Tuttavia, non è univoca la tecnica con cui operare l'avvezione dell'eco radar. Nel corso degli anni si sono sviluppate diverse tecniche per guidare lo spostamento di una matrice di pixel secondo un campo di moto ad essa associato, ciascuna con le sue peculiarità. In questo lavoro di tesi si farà riferimento principalmente agli studi avvettivi di Germann e Zawadzki (2002) [41], in quanto l'algoritmo in linguaggio Python che si utilizzerà per l'implementazione del metodo di *estrapolazione Lagrangiana* seguirà gli schemi avvettivi sviluppati dai due autori.

Determinato il campo di moto al tempo t_0, l'assunzione che tipicamente si fa, e che verrà da noi fatta seguendo l'operato di Germann e Zawadzki, è quella di *congelare* il campo di moto per l'intero *forecast period*, assumendone la *stazionarietà* e, di conseguenza, eliminandone la dipendenza dalla variabile tempo:

$$\mathbf{v}\left(t_0, \mathbf{x}\right) = \mathbf{v}\left(t, \mathbf{x}\right) = \mathbf{v}\left(\mathbf{x}\right) \ .$$

Il pattern dell'eco radar, cioè, viene avvetto nel tempo sulla base del medesimo campo di moto, qualunque sia l'orizzonte temporale di previsione τ. Quest'assunzione permette di calcolare il campo delle velocità solamente una volta, sulla base della sola finestra di assimilazione $\hat{t} \leq t \leq t_0$, evitando di ricalcolarlo di continuo al trascorrere di un certo tempo T (ad esempio 15 minuti) facendo scorrere l'*assimilation window*. In questo modo la procedura di avvezione ne risulta semplificata, ma questo beneficio si scontra

con l'errore che si commette nel considerare *stazionario* un campo di moto che, in misura minore o maggiore a seconda della tipologia di evento piovoso, continua a evolvere nel tempo.

3.4.5.1 Schema a vettori costanti

Sulla scorta di quest'assunzione, si procede con il presentare i possibili schemi avvettivi. Come prima possibilità, si può pensare di utilizzare uno schema di avvezione *a vettori costanti*, spostando il singolo pixel al tempo t_0 direttamente al tempo $(t_0 + \tau)$, con un unico salto temporale ampio esattamente il *lead time*. Il vettore spostamento, denominato $\boldsymbol{\alpha}$, è dato dal prodotto di vettore velocità e *lead time*, per cui per un pixel con generiche coordinate $\mathbf{x_P}$ del suo centro, il vettore spostamento è determinato dalla relazione

$$\boldsymbol{\alpha}\left(\mathbf{x_P}\right) = \mathbf{v}\left(\mathbf{x_P}\right)\tau \ . \tag{3.12}$$

Si sottolinea che, avendo a che fare con dei pixel, quindi con delle aree quadrate di dimensione finita, i vettori posizione, spostamento e velocità li si riferisce al centro esatto di essi, dando vita a una griglia spaziale i cui *punti di griglia* giacciono al centro di ciascun pixel.

L'equazione (3.12) produce dei vettori spostamento univoci per ciascun pixel, costanti per l'intero periodo di previsione. É per questa ragione che lo schema avvettivo appena presentato viene denominato *schema a vettori costanti*. Esso produce una traslazione rigida di ogni singolo pixel attraverso l'intero *lead time* τ, non permettendo rotazione. Ogni pixel trasla secondo il suo specifico vettore spostamento, dando vita a un pattern finale fortemente distorto dalle traslazioni spesso incongrue dei singoli pixel, generanti spesso sovrapposizione o, al contrario, zone vuote.

3.4.5.2 Schema semi-Lagrangiano

Ma già nel 1963 uno studio di Sawyer sulla vorticità [100] sottolineava le forti limitazioni di questo schema avvettivo, e ne proponeva una versione leggermente modificata, che denominava *schema semi-Lagrangiano*. L'idea di Sawyer fu portata avanti da Robert in uno studio del 1981 [95], ed è a quest'ultimo che Germann e Zawadzki fanno riferimento nel loro articolo.

L'idea fondante dello *schema semi-Lagrangiano* è quella di non operare un unico spostamento rigido coprendo con un solo salto l'intero tempo di forecast τ, ma suddividere l'avvezione in N step di ampiezza temporale Δt, dato da

$$\Delta t = \frac{\tau}{N} \ .$$

Spezzettando lo spostamento in tanti piccoli spostamenti si sarebbe potuto seguire, seppur con un certo errore, l'andamento delle linee di flusso (le cosiddette *stream lines*) descritte dalle particelle d'aria in moto.

Per ognuno degli step temporali, il vettore spostamento è calcolato iterativamente utilizzando la seguente equazione nell'incognita $\boldsymbol{\alpha}$:

$$\boldsymbol{\alpha}\left(\mathbf{x}\right) = \mathbf{v}\left(\mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}\right)\Delta t \ . \tag{3.13}$$

Si nota che non si è utilizzato il punto specifico $\mathbf{x_P}$, ma il generico $\mathbf{x}$, e questo perché la procedura *semi-Lagrangiana* inizia sì dal punto P di griglia con coordinate $\mathbf{x_P}$, ma a differenza della procedura *a vettori costanti* prevede step sequenziali che portano al progressivo spostamento *a saltelli* a partire dal punto P, facendo tappa intermedia su altri punti di griglia. L'elenco di operazioni che segue chiarisce come utilizzare l'equazione (3.13):

1. Si sceglie il numero di step temporali, N, e di conseguenza si calcola il Δt, intervallo temporale tra uno step e l'altro;

2. Si sceglie un generico punto P (la procedura andrà seguita per tutti i punti P della griglia spaziale) con coordinate $\mathbf{x_P}$. Essendo il primo step, si è esattamente centrati in P, perciò si impone $\boldsymbol{\alpha} = 0$ al secondo membro dell'equazione (3.13), in modo da ottenere il vettore velocità centrato in $\mathbf{x_P}$, ovvero $\mathbf{v}\left(\mathbf{x} = \mathbf{x_P}\right)$. L'equazione (3.13) diventa

$$\boldsymbol{\alpha}\left(\mathbf{x_P}\right) = \mathbf{v}\left(\mathbf{x_P}\right)\Delta t \ .$$

3. Dall'equazione algebrica appena scritta si ottiene immediatamente lo spostamento $\boldsymbol{\alpha}\left(\mathbf{x_P}\right)$ del punto P. Essendo il primo spostamento, valido per il primo lasso di tempo Δt, ovvero per l'intervallo $t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$, lo si indica con $\boldsymbol{\alpha_1}$. Il punto $\mathbf{x_P}$, in qualità di primo punto, lo si chiama $\mathbf{x_P} = \mathbf{x_{P_1}}$, mentre il nuovo punto dello spazio raggiunto con lo spostamento $\boldsymbol{\alpha_1}$ è il punto $\mathbf{x_{P_2}} = \mathbf{x_{P_1}} - \boldsymbol{\alpha_1}$.

4. Si passa al secondo step temporale, relativo al secondo Δt, ovvero relativo all'intervallo di tempo $t_0 + \Delta t \leq t \leq t_0 + 2\Delta t$. Per il calcolo del secondo spostamento, questa volta occorre usare l'equazione (3.13) in modo iterativo, fornendo come primo tentativo per l'incognita $\boldsymbol{\alpha_2}$ lo spostamento allo step precedente, ovvero l'$\boldsymbol{\alpha_1}$:

$$\boldsymbol{\alpha_1} = \mathbf{v}\left(\mathbf{x_{P_1}} - \boldsymbol{\alpha_1}\right)\Delta t + \varepsilon \ .$$

Imponendo l'uguaglianza, nasce un errore ε tra membro di sinistra e membro di destra, errore che si può ridurre con poche iterazioni (tipicamente ne sono sufficienti due oppure tre) poiché si raggiunge rapidamente la convergenza.

5. Si ottiene il secondo spostamento $\boldsymbol{\alpha_2}$, differente in direzione e in modulo rispetto ad $\boldsymbol{\alpha_1}$ in quanto per il suo calcolo si è utilizzato un vettore velocità non più pari al $\mathbf{v}\left(\mathbf{x} = \mathbf{x_{P_1}}\right)$ centrato in P, bensì corrispondente al $\mathbf{v}\left(\mathbf{x_{P_1}} - \boldsymbol{\alpha_2}\right)$ centrato in $\left(\mathbf{x_{P_1}} - \boldsymbol{\alpha_2}\right)$. Il nuovo punto dello spazio raggiunto dopo lo spostamento $\boldsymbol{\alpha_2}$ è $\mathbf{x_{P_3}} = \mathbf{x_{P_2}} - \boldsymbol{\alpha_2}$. Questo nuovo punto sarà il punto di partenza per lo step temporale successivo.

6. Si ripetono le operazioni al punto **4** e al punto **5**, risolvendo iterativamente a ogni step l'equazione

$$\boldsymbol{\alpha_k} = \mathbf{v}\left(\mathbf{x_{P_k}} - \boldsymbol{\alpha_k}\right)\Delta t + \varepsilon \ ,$$

con il pedice k che rappresenta lo step temporale (e non l'indice d'iterazione), e utilizzando come primo tentativo per $\boldsymbol{\alpha_k}$ lo spostamento ottenuto allo step precedente. Per quanto visto nei punti precedenti, per $\mathbf{x_{P_k}}$ vale la relazione

$$\mathbf{x_{P_k}} = \mathbf{x_{P_{k-1}}} - \boldsymbol{\alpha_{k-1}} \ .$$

Si prosegue, step temporale dopo step temporale, finché non si arriva all'intervallo temporale $t_0 + (N-1)\Delta t \leq t \leq t_0 + \tau$, raggiungendo così il *lead time* τ.

Il risultato di questa procedura fornisce una sequenza di vettori spostamento $\boldsymbol{\alpha_k}$, differenti l'uno dall'altro in direzione e modulo, che posti in sequenza l'uno all'altro forniscono una traccia (imprecisa e spezzettata) della *linea di flusso* descritta da una particella d'aria in moto seguita a partire dal punto P (si veda l'esempio in FIGURA 3.2).

Si nota che l'equazione (3.13), utilizzata da Sawyer [100] e da Robert [95], vede in Germann e Zawadzki [41] una leggera modifica: il campo di moto utilizzato per ciascuno step temporale non è quello relativo al punto $(\mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha})$, ma relativo al punto a metà tra $\mathbf{x}$ e $(\mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha})$, ovvero $(\mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}/2)$:

$$\boldsymbol{\alpha}\left(\mathbf{x}\right) = \mathbf{v}\left(\mathbf{x} - \frac{\boldsymbol{\alpha}}{2}\right)\Delta t \ .$$

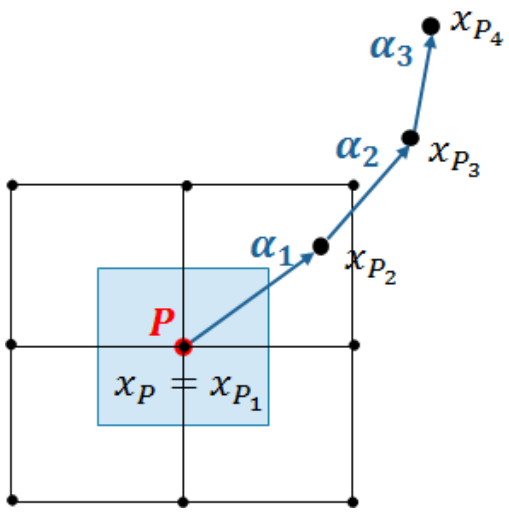


FIGURA 3.2: **Vettori spostamento nello schema semi-Lagrangiano.** La figura soprastante mostra un esempio di *spezzata* che si ottiene applicando lo schema di avvezione *semi-Lagrangiano*. Un punto P al centro di un pixel (e contemporaneamente al centro di un estratto di griglia spaziale) rappresenta il generico punto dello spazio rappresentativo di un'area discreta, e portante con sé un'informazione, ad esempio il colore celeste che lo contraddistingue. I vettori spostamento $\boldsymbol{\alpha_k}$ spostano quest'informazione lungo un percorso fatto di segmenti di differente lunghezza e orientazione, che percorrono all'incirca la linea di flusso lungo cui si muove l'informazione.

Questa modifica non altera l'idea di ricostruire, in modo *discreto*, le linee di flusso percorse dalle particelle fluide, però altera leggermente la filosofia dietro lo schema, in quanto per l'avvezione a un certo step non viene utilizzato il campo di moto presente al punto d'arrivo, bensì quello presente a metà tra il punto d'arrivo e il punto di partenza, fornendo di conseguenza un risultato leggermente differente.

Ecco che, dopo questa trattazione matematica, appare chiaro il motivo del nome assegnato allo schema di avvezione: *semi-Lagrangiano* perché con questo schema si tenta di seguire la particella fluida nel suo moto, proprio come farebbe un metodo puramente Lagrangiano, e tuttavia la discretizzazione del dominio spaziale (dovuta al fatto che si hanno a disposizione *pixel*, ovvero aree quadrate di misura finita portanti un'informazione su di essi costante) non permette di seguire la particella fluida alla perfezione, commettendo un certo errore.

3.4.5.3 Filosofia forward e backward

Ma non finisce qui, poiché una volta scelto di utilizzare lo schema *semi-Lagrangiano* (oppure quello *a vettori costanti*) esistono due possibili modi per condurre l'avvezione, e dispensare il valore associato a un certo pixel ad altri pixel.

Schema *forward in time*
Il primo, il più intuitivo e immediato, è detto *in avanti*, ma più comunemente viene usata la dicitura inglese *forward in time*. Secondo questa filosofia, si parte al tempo t_0 disponendo di una griglia regolare di pixel, e si assume la corrispondenza tra pixel e particella fluida, per cui ciascun pixel trasporta un preciso valore del campo in studio, il generico Ψ. Nel condurre l'avvezione *avanti nel tempo*, ovvero nel verso delle linee di flusso (in inglese *downstream*), accade però che a spostamento ultimato la particella-pixel non occupi più una posizione di griglia, venendo a contatto con 4 pixel e facendo nascere un problema di assegnazione del valore Ψ trasportato. La soluzione consiste nel distribuire il valore avvetto a tutti i pixel *toccati* dal pixel spostato (si veda l'esempio schematico riportato nell'immagine di sinistra della FIGURA 3.3).

La distribuzione del valore Ψ a ogni step temporale porta a una continua perdita di accuratezza sulle piccole scale, dovuta alla continua ridistribuzione di informazioni secondo un criterio arbitrario. Infatti, come fa notare Ringler [94], il concatenarsi di molteplici step con schema *forward* conduce a una continua distorsione dello spazio occupato dalle particelle fluide.

Per evitare tale distorsione, e per la difficoltà nel dover trovarsi a scegliere un raggio d'influenza al momento della redistribuzione del valore di Ψ (infatti un raggio troppo ridotto porterebbe a evidenti disomogeneità nel campo pronosticato, mentre uno troppo ampio causerebbe perdita di accuratezza sulle piccole scale), la pensata è stata lo schema *backward in time*.

Schema *backward in time*
Lo schema avvettivo semi-Lagrangiano di tipo *backward*, ovvero *all'indietro*, evita la ridistribuzione del valore di Ψ con l'idea di non partire dal campo Ψ_{t_0} al tempo t_0, ma posizionarsi direttamente su di un pixel al tempo futuro $(t_0 + \Delta t)$, pixel ancora privo di un valore $\Psi_{t_0+\Delta t}$, e risalire la linea di flusso che termina al centro del pixel considerato, arrivando al tempo t_0 in un punto ancora una volta non appartenente alla griglia. In

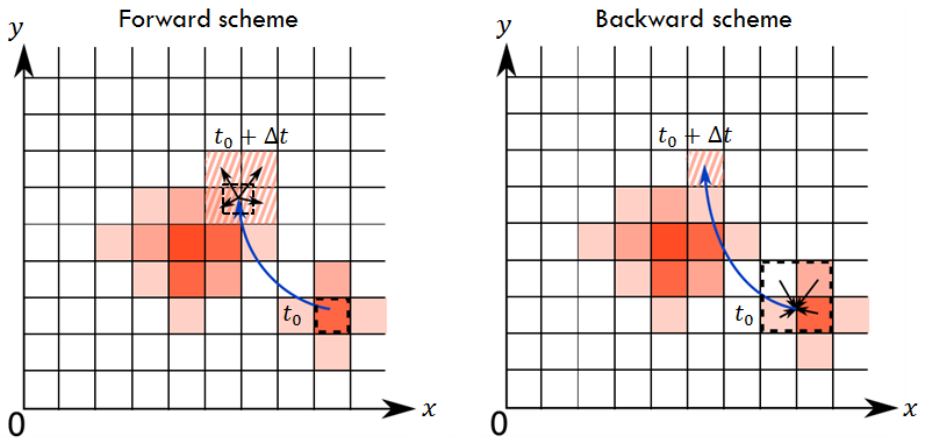


FIGURA 3.3: **Schemi d'avvezione *forward* e *backward*.** Nella figura soprastante, tratta da uno studio di Palmroth *et al.* [82], a sinistra è schematizzato lo schema avvettivo *forward in time*, a destra quello *backward in time*. Nel primo, un pixel al tempo t_0 viene spostato in un tempo Δt lungo la sua linea di corrente, finendo in un punto non di griglia, e imponendo così una distribuzione del valore trasportato ai pixel vicini. Nel secondo, invece, si parte da un pixel al tempo futuro $(t_0 + \Delta t)$, e si risale la linea di corrente che termina in quel pixel, sino a giungere al tempo t_0 in un punto ancora una volta non appartenente alla griglia, e rendendo così necessaria un'interpolazione dei valori Ψ associati ai pixel coinvolti.

questo caso, poiché non si è trasportato un valore di campo lungo il tragitto come nel caso *forward*, occorre assegnare questo valore sulla base dei valori Ψ_{t_0} posseduti dai pixel *toccati* all'arrivo. Un modo per far questo è quello d'interpolare questi valori, pervenendo a un valore univoco che possa assegnarsi al pixel del tempo futuro $(t_0 + \Delta t)$ da cui si è partiti.

La filosofia *backward in time*, dunque, opera la risalita della corrente partendo da un pixel *del futuro* e percorrendo in verso contrario le linee di flusso (movimento detto *upstream*), così determinando il punto d'origine di quel pixel e assegnandogli un valore di Ψ tramite interpolazione. Quest'ultima operazione, come quella di ridistribuzione che avveniva con lo schema *forward*, produce una perdita di accuratezza sulle piccole scale. Tuttavia il vantaggio nell'uso di questo schema è soprattutto quello di non produrre la grossa distorsione delle particelle fluide che si aveva con lo schema *in avanti*, oltre che quella di non dover scegliere un raggio di ridistribuzione ottimale.

Lo svantaggio principale nell'utilizzo dello schema *backward* consiste nel fatto che questo schema non conservi la massa. Difatti, solo gli schemi *forward* soddisfano l'equazione di conservazione della massa, esprimibile

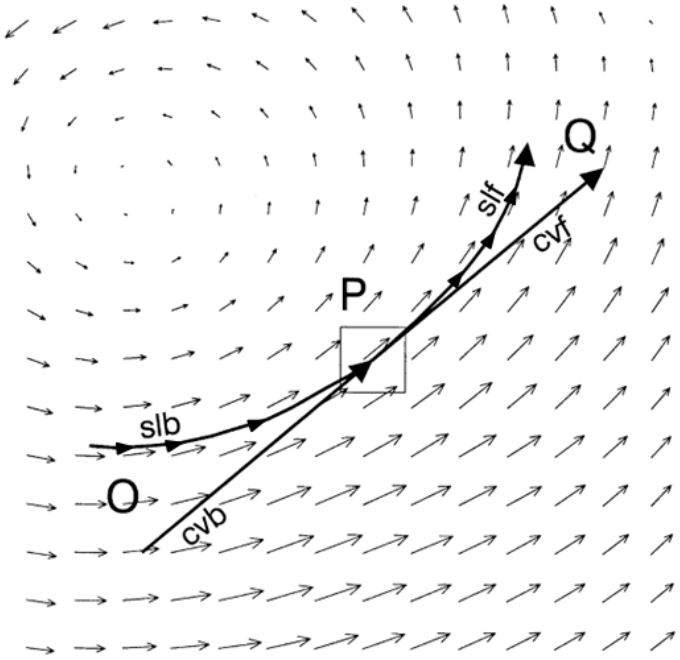


FIGURA 3.4: **Avvezione *a vettori costanti* e *semi-Lagrangiana*.** Nella figura soprastante, tratta dall'articolo di Germann e Zawadzki [41], viene mostrata la differenza tra lo schema d'avvezione *a vettori costanti* e quello *semi-Lagrangiano*, evidenziandone sia l'utilizzo *backward* che quello *forward*. Iniziando con lo schema *forward*, un campo di moto fa da sfondo all'immagine, e secondo quel campo di moto viene fatta avvezione del pixel contrassegnato con P e posizionato al tempo t_0 il quale, secondo lo schema *a vettori costanti* (il *cvf*, ovvero *constant vector forward*) e secondo lo schema *semi-Lagrangiano* (il *slf*, ovvero *semi-Lagrangian forward*), viene trasportato in un punto Q, differente a seconda dello schema. Per quanto concerne il *backward*, il punto P questa volta rappresenta il pixel obbiettivo al tempo $(t_0 + \Delta t)$, e risalendo alla sua origine al tempo t_0 si arriva al punto O, differente a seconda dello schema, *a vettori costanti* (*cvb*) oppure *semi-Lagrangiano* (*slb*). É evidente la maggiore qualità dei risultati derivante dall'uso dello schema semi-Lagrangiano, evidenza dovuta soprattutto alla forte *componente rotazionale* presente nel campo di moto. Nel caso in cui si abbia, invece, un campo di moto prettamente *traslatorio*, con vettori velocità pressoché nella stessa direzione, anche lo schema *a vettori costanti* potrebbe portare ottimi risultati.

in forma differenziale come

$$\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \nabla \cdot (\varrho \mathbf{v}) = 0 \ ,$$

lasciando di conseguenza costante il valor medio del campo Ψ avvetto. Tuttavia, nella pratica, il termine di divergenza del campo di moto che compare all'interno dell'equazione di conservazione è molto piccolo, al limite trascurabile, rendendo in prima approssimazione *conservativi* anche gli schemi *all'indietro*.

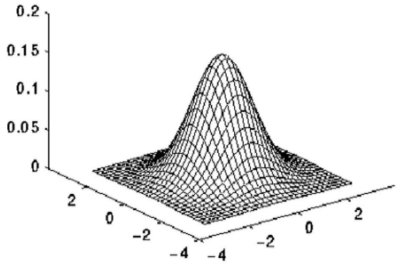
La filosofia *backward* può applicarsi anche allo schema d'avvezione *a vettori costanti*, in quanto quest'ultimo può vedersi come la riduzione di uno schema *semi-Lagrangiano* a un unico step temporale ampio il *lead time* τ. La FIGURA 3.4 mostra l'utilizzo dei due schemi avvettivi seguendo entrambe le filosofie *in avanti* e *all'indietro*, mostrando quanto sia evidentemente preferibile non privarsi dello schema *semi-Lagrangiano*, soprattutto nei casi in cui il quantitativo di *rotazione* presente nel campo di moto non sia trascurabile.

Qualunque schema di avvezione venga scelto, si perviene a una sequenza di echi radar estrapolati tramite avvezione a partire dall'eco al tempo t_0, sino al *lead time* τ, e questi costituiranno la *previsione*. Il numero di estrapolazioni disponibili dipenderà dalla scelta del passo temporale Δt tra uno step temporale e il successivo, determinando la risoluzione temporale della previsione (tipicamente ogni 5 oppure ogni 10 minuti).

Per l'avvezione del campo di pioggia finalizzata all'ottenimento di una previsione di *nowcasting* tramite la via dell'estrapolazione dell'eco radar, in questo studio di tesi verrà utilizzato lo schema *semi-Lagrangiano all'indietro* (in lingua inglese *semi-Lagrangian backward scheme*), lo stesso scelto da Germann e Zawadzki [41] e poi implementato nelle routine del tool *Pysteps* [89], del quale si sfrutteranno le potenzialità.

3.4.5.4 Diffusione numerica

In tutti gli schemi appena discussi, la quantità Ψ rappresentante la precipitazione deve essere manipolata: o interpolata a partire *da* pixel vicini, o ridistribuita *a* pixel vicini. Ad esempio, Germann e Zawadzki [41] ricorrono a una ridistribuzione di tipo *Gaussiano* nel caso dello schema *forward* (si veda la FIGURA 3.5), con un raggio d'influenza proporzionale alla lunghezza del vettore spostamento, e a un'interpolazione *bilineare a 4 punti* oppure *cubica a 16 punti* nel caso dello schema *backward*.



$$\frac{1}{273}\begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

FIGURA 3.5: **Distribuzione gaussiana bidimensionale.** In figura è mostrato un esempio di *distribuzione gaussiana bidimensionale*, generalizzazione della distribuzione gaussiana più tipica, quella unidimensionale, detta *distribuzione normale*[5]. Nel grafico di sinistra, la distribuzione presenta una *media* $\mu = 0$ (la campana è centrata nel punto di coordinate $(0, 0)$) e una deviazione standard $\sigma = 1$. Nella matrice di sinistra, un'approssimazione discreta della distribuzione gaussiana.

Entrambe le operazioni producono una perdita di dettaglio sulle piccole scale, riconducibile al fenomeno di *diffusione numerica*, anche detta *dissipazione numerica*. Dalle equazioni, infatti, sembra che ci sia un termine d'attrito che dissipi potenza, e tuttavia non si tratta di un termine fisico: deriva dalla discretizzazione delle equazioni e dall'utilizzo di schemi alle differenze finite per la gestione dei termini derivati nello spazio oppure nel tempo. Perché i risultati non siano modificati troppo dalla *diffusione numerica*, occorre controllarla e renderla il più piccola possibile.

Un modo per risolvere alla radice il problema sarebbe quello di utilizzare un singolo vettore spostamento valido per l'intero dominio spaziale. In questo modo è vero che non si dovrebbe ricorrere alla ridistribuzione o all'interpolazione, e si preserverebbe il dettaglio delle piccole scale, ma al contempo si avrebbe un'avvezione *media* del campo Ψ, non secondo le linee di flusso locali, perdendo in accuratezza dell'avvezione.

Escludendo così questa opzione, Germann e Zawadzki [41] hanno ideato una versione modificata dello schema all'indietro semi-Lagrangiano. Se nella versione originale di quest'ultimo l'interpolazione veniva condotta per ogni singolo step temporale ampio Δt, portando a una diffusione numerica tanto maggiore quanto più grande era il numero di step temporali, nella versione modificata ci si riduce a una sola interpolazione, indipendentemente dal numero di step temporali scelto. Questo è possibile se si segue la linea di flusso all'indietro, dal tempo $(t_0 + \tau)$ sino al tempo t_0, attraverso ogni step temporale, compiendo l'interpolazione solo una volta giunti al tempo t_0 iniziale.

Ecco il cosiddetto *modified semi-Lagrangian backward scheme*, quello adottato da Germann e Zawadzki nel loro studio del 2002 sulla dipendenza della predicibilità dalla scala spaziale [41]. Essendo *semi-Lagrangian*, permette la rotazione del campo di moto; essendo *backward*, non possiede la problematica della ridistribuzione del valore di Ψ; ed essendo *modified*, riduce moltissimo la diffusione numerica, concentrando l'interpolazione a un solo e unico step temporale, l'ultimo.

3.4.6 Predicibilità della persistenza Lagrangiana

Come contestualmente sottolineato, analogamente al caso della *persistenza Euleriana*, anche la predicibilità associata al metodo di *persistenza Lagrangiana* può quantificarsi utilizzando le definizioni di *funzione di decorrelazione*, $c(\tau)$, e di *tempo di decorrelazione*, L, fornite in occasione del discorso sulla predicibilità della *persistenza Euleriana* e qui riproposte, ricordando che con $\Psi(x, y, t)$ si indica il campo *osservato* e con $\hat{\Psi}(x, y, t)$ il campo *previsto*:

$$c(\tau) = \frac{\displaystyle\int_\Omega \Big(\hat{\Psi}(t_0+\tau, \mathbf{x})\, \Psi(t_0+\tau, \mathbf{x})\Big)\, d\mathbf{x}}{\sqrt{\displaystyle\int_\Omega \hat{\Psi}^2(t_0+\tau, \mathbf{x})\, d\mathbf{x} \int_\Omega \Psi^2(t_0+\tau, \mathbf{x})\, d\mathbf{x}}} \,.$$

$$L = \int_0^\infty c(\tau)\, d\tau$$

Un esempio di predicibilità associata ai due metodi di persistenza viene fornito in FIGURA 3.6. Essa mostra l'andamento della correlazione tra le osservazioni e le previsioni fatte dai due tipi di persistenza, per un tempo di previsione fino alle 8h. Si osserva come la predicibilità associata alla *persistenza Euleriana* risulti quella con la peggiore correlazione con le osservazioni, mentre quella associata alla *persistenza Lagrangiana* abbia una correlazione superiore. Se, in più, si opera un filtraggio spaziale sulle osservazioni, la correlazione associata alla *persistenza Lagrangiana* migliora ulteriormente.

3.5 Limiti dei metodi di persistenza

Che siano fondati sulla *persistenza Euleriana* oppure su quella *Lagrangiana*, i metodi di nowcasting basati sull'*estrapolazione* di una previsione a

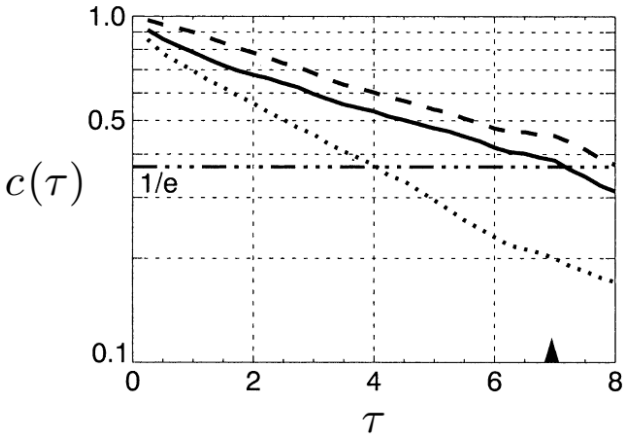


FIGURA 3.6: **Predicibilità dei metodi di persistenza.** La figura, tratta da un articolo del 2002 di Germann e Zawadzki [41], mostra un esempio di andamento della funzione di correlazione $c(\tau)$ all'aumentare del *lead time* τ per tre tipologie di previsioni basate sulla persistenza: Euleriana (curva puntinata), Lagrangiana pura (curva continua), e Lagrangiana con l'applicazione di un filtro spaziale sulle osservazioni con soglia pari a 64 km (curva tratteggiata). Il triangolino nero in corrispondenza delle 7h di *lead time* individua il tempo di decorrelazione per la persistenza Lagrangiana *pura*, tempo arrivato il quale la funzione $c(\tau)$ ha raggiunto il valore di $\frac{1}{e}$. Gli specifici risultati in figura sono relativi a un evento piovoso del 30 Giugno 1998 con estensione di circa 600 000 km^2.

partire da una sequenza di immagini radar appaiono limitati da una serie di fonti d'incertezza. In questa sezione le si proverà a descrivere, focalizzando in modo particolare l'attenzione sull'errore dovuto alla mancata considerazione dell'evoluzione interna della precipitazione.

3.5.1 Le fonti d'incertezza

Seguendo la classificazione di esse fatta da Germann *et al.* [42], le si può suddividere in tre classi:

1 – **Incertezza legata alle condizioni iniziali:** questo tipo d'incertezza si deve agli errori presenti nelle misurazioni radar. Come sarà descritto nel capitolo *NACO – I dati radar*, all'interno della sezione sul radar meteorologico, in un network di radar ben manutenuto e ben calibrato, le principali fonti d'errore sono relative alla variabilità spazio-temporale del profilo verticale di riflettività (il cosiddetto *vertical profile of reflectivity*, abbreviato con VPR), alla variabilità della relazione Z–R più adeguata, al parziale o totale blocco

del fascio radar, al fenomeno del *clutter*, e infine all'attenuazione del segnale [110].

2 – **Incertezza legata a caratteristiche del modello:** in questa classe d'errore s'includono imperfezioni insite nel modello di nowcasting e nella selezione dei suoi parametri. Nello specifico, gli errori principali di questa classe sono riconducibili a inaccuratezze insite nell'algoritmo per il calcolo del campo di moto, alla scelta dei parametri del modello e, in minor grado, alla diffusione numerica che nasce con l'applicazione dello schema di avvezione scelto (per quest'ultimo punto, si veda il paragrafo intitolato *Diffusione numerica* all'interno della sezione precedente *La Persistenza Lagrangiana*).

3 – **Incertezza legata all'ipotesi di persistenza:** si tratta sempre di incertezza dovuta al modello, ma nello specifico è relativa all'assunzione di *persistenza* nel tempo dello stato atmosferico osservato a un dato istante t_0. Con questa assunzione, risulta impossibile prevedere l'evoluzione futura dell'intensità di precipitazione (nascita, crescita, decadimento e scomparsa della precipitazione) e il campo di moto futuro, oltre a proprietà statistiche dei campi di pioggia come l'autocorrelazione spaziale e temporale oppure la *probability density function* (PDF).

Come fatto notare da Fabry e Seed [31], queste tre classi d'incertezza possono portare a un errore non indifferente nelle stime quantitative di precipitazione (in inglese *quantitative precipitation estimation*, abbreviate con QPE) già nella prima ora di nowcast. Per questo motivo, un approccio comune in letteratura scientifica per quantificare l'ammontare dell'incertezza è stato quello di generare contemporaneamente tante QPE valide per la stessa finestra temporale di previsione, producendo i cosiddetti *QPE ensembles* (un illustre studio di tal tipo è stato condotto da Germann *et al.* nell'articolo del 2009 intitolato *REAL–Ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region* [40]).

Tralasciando la soluzione degli *ensemble*, una possibilità per procedere è quella d'individuare la fonte d'incertezza maggiore e, individuatala, concentrarsi solamente sullo studio di quella con l'intento di trovare soluzioni che migliorino il *forecast* circoscrivendo una specifica fonte d'errore. Perciò, come sottolineano Bowler *et al.* [20], se la qualità del prodotto radar è buona (classe d'incertezza 1) e se il modello di nowcasting è un buon modello (classe d'incertezza 2), la principale fonte d'errore oltre un

lead time di 30 minuti appartiene alla terza classe delle fonti d'incertezza, quella dovuta ai processi evolutivi che trasformano la precipitazione. Ecco individuato il bersaglio delle analisi *mirate*.

3.5.2 Persistenza contro evoluzione

Il processo evolutivo della perturbazione piovosa, come descritto da diversi articoli scientifici del settore (ad esempio si vedano gli studi [38] [89]), può essere scomposto in quattro fasi:

1 – Nascita (*initiation*)
2 – Crescita (*growth*)
3 – Decadimento (*decay*)
4 – Scomparsa (*termination*)

Questi processi, violando l'ipotesi di *persistenza* nel tempo della generica quantità Ψ misurata seguendo una particella fluida, matematicamente resa dall'equazione

$$\frac{D\Psi}{Dt} = 0 \ , \tag{3.14}$$

non possono essere pronosticati in alcun modo.

Per questo motivo il metodo della *persistenza Lagrangiana*, a qualunque sistema fisico sia applicato (e quindi considerando un generico campo Ψ), pur essendo più evoluto del metodo di *persistenza Euleriana* non riesce spesso a rappresentare quello che davvero accade nella realtà a causa del decadere di questa assunzione fondante.

Calandosi nel problema della precipitazione, e quindi identificando Ψ con un dato che rappresenti la quantità di pioggia (Z oppure R tipicamente), si proverà adesso ad approfondire la fonte d'incertezza legata all'evolvere naturale della perturbazione, e a citare qualche metodo volto a porre un parziale rimedio.

L'errore che si commette nell'assumere la veridicità dell'equazione (3.14) è dovuto principalmente al fatto che, come accennato al punto **3** della classifica delle incertezze, la precipitazione non persiste all'infinito, ma evolve nel tempo, creandosi dal nulla, e nel nulla scomparendo. Come visto, però, la *persistenza Lagrangiana* non ammette minimamente, all'interno delle equazioni che la governano, la possibilità che la precipitazione aumenti d'intensità, per poi decadere fino a scomparire del tutto, anzi, dichiara esattamente il contrario, escludendo qualsiasi forma di evoluzione della precipitazione.

Questo limite associato alle previsioni meteorologiche a brevissimo termine tramite uno schema basato sulla *persistenza Lagrangiana* non permette di ottenere previsioni affidabili per un *forecast time* ampio, ovvero tipicamente al di là delle 3 ore di anticipo, tempo oltre il quale l'evoluzione interna della precipitazione potrebbe aver stravolto il pattern piovoso, rendendo totalmente lontana dal reale la previsione. E tuttavia, se ci si tiene entro le 2 o 3 ore di anticipo, il *nowcasting* tramite *persistenza Lagrangiana* risulta spesso più affidabile di qualsiasi altro metodo di previsione.

In più, tipicamente è il tipo di evento piovoso a determinare il tempo di previsione oltre il quale l'estrapolazione Lagrangiana non può ritenersi più affidabile. Difatti, per eventi con carattere *stratiforme* Browning *et al.* [21] hanno mostrato che le abilità di previsione di tecniche di estrapolazione da eco radar posso arrivare sino alle 6 ore di anticipo, mentre per eventi con forte carattere *convettivo* quali i temporali, la presenza massiccia di processi di crescita e decadimento della perturbazione può far scendere il tempo di previsione ritenuto affidabile a 20–30 minuti.

Poiché difficilmente si può pensare d'introdurre, in uno schema basato sull'estrapolazione di echi radar, i due processi estremi dell'evoluzione di una perturbazione, ovvero la sua *nascita* e la sua *scomparsa* (appannaggio quasi esclusivo dei modelli numerici di previsione), tuttavia si può pensare d'inserire almeno i processi evolutivi intermedi all'interno del metodo della *persistenza Lagrangiana*: la *crescita* e il *decadimento* della precipitazione. É questo l'obbiettivo che si perseguirà nel paragrafo che segue.

3.5.3 I processi di Growth & Decay

La previsione dei processi di *crescita* e *decadimento* della precipitazione risulta essere meno gravosa rispetto alla previsione della *nasita* o della *scomparsa* della stessa. Infatti, trattandosi di processi che partono da una perturbazione già nucleata, prevederli vuol dire tentare di pronosticare *semplicemente* l'evoluzione della precipitazione presente, compito sicuramente meno difficoltoso rispetto al pronostico della *nascita*, che al contrario avviene dal nulla.

In lingua inglese, i processi di *crescita e decadimento* di una precipitazione sono detti *Growth & Decay*, da cui il nome del paragrafo. Di qui in avanti, per comodità, li si abbrevierà con la sigla G&D [38].

É importante definire con chiarezza il binomio *Growth & Decay* (a volte chiamato *Growth & Dissipation*) nell'ambito dei sistemi piovosi perché da questo termine dipendono molti complicati processi atmosferici, dalla formazione delle nuvole alle gocce di pioggia che impattano sulla superfi-

cie terrestre [90]. Infatti, cambiamenti nei processi microfisici o dinamiche associate ai venti verticali od orizzontali conducono a significativi cambiamenti nell'output piovoso. Per esempio, le goccioline d'acqua nelle nuvole, formatesi per condensazione di vapore acqueo, possono *crescere* per aggregazione, formando gocce d'acqua liquida oppure direttamente solida (nel caso in cui la temperatura atmosferica sia sotto gli 0°C), per poi *decadere* per evaporazione o per sublimazione. Oppure ancora, una goccia di pioggia può *crescere* di dimensioni aggregandosi ad altre gocce, e questo avviene tipicamente per *collisione*, governata dai venti verticali e orizzontali. Con questi esempi appare evidente come il processo di G&D sia associato all'intero sistema piovoso, intervenendo nella sua evoluzione a tutti i livelli.

Questo rende molto difficile pronosticare la G&D di una precipitazione, e tuttavia una definizione teorica può darsi. A tal fine si fa riferimento all'equazione di conservazione del *contenuto d'acqua della precipitazione*, M, sviluppata da Kessler nel 1969 [55]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \mathbf{v_h} \cdot \nabla_h M + (w + v_t)\frac{\partial M}{\partial z} + M\left(\frac{\partial v_t}{\partial z} + w\frac{\partial(\ln(\varrho))}{\partial z}\right) = S_M \ .$$

Chiamando $\mathbf{v} = (u, v, w)$ il vettore velocità del vento, diverse componenti di velocità compaiono nell'equazione: il vettore $\mathbf{v_h}$, che rappresenta il vettore velocità proiettato sul piano orizzontale, di modulo $\|\mathbf{v_h}\| = \sqrt{u^2 + v^2}$; w, la componente verticale del vettore velocità; v_t, la *velocità terminale di caduta* di una goccia d'acqua. Inoltre, ϱ rappresenta la densità dell'aria, mentre S_M è il *termine di source-sink*, ovvero un termine che faccia da *sorgente* (*source*) e al contempo da *pozzo* (*sink*), e rappresenta tutti quei processi microfisici che portano a variazioni nel *contenuto d'acqua della precipitazione*. Senza il termine S_M, perciò, sarebbero impediti i processi di G&D che avvengono nella realtà, e che modificano in continuazione il contenuto d'acqua in un sistema piovoso. Per questo motivo è proprio il termine S_M che racchiude, formalmente, tutti i processi di G&D.

Ma poiché in meteorologia il fine ultimo è il calcolo della pioggia che tocca terra, il termine di G&D può definirsi sulla base della sola pioggia accumulata in superficie, dato che viene fornito da strumenti come pluviometri e radar meteorologici. Pensando di disporre di osservazioni radar, il termine di G&D può, nell'ambito del nowcasting, dirsi pari alla variazione discreta di riflettività avuta in un certo lasso di tempo discreto seguendo una particella in moto (ovvero piantandosi in un punto dello spazio in

coordinate mobili):

$$S = \frac{\Delta Z}{\Delta t} \ .$$

Perché il *contenuto* di riflettività vari nel tempo, non deve conservarsi il valore totale di Z. Pensandola in termini non discreti, la derivata Lagrangiana non deve annullarsi, e dunque quest'ultima rappresenta in forma differenziale il termine di G&D:

$$S = \frac{DZ}{Dt} \ .$$

Fissando un punto dello spazio nel *frame Lagrangiano*, ovvero nel frame in coordinate mobili, si può pensare d'introdurre un termine che rappresenti il processo di G&D all'interno della relazione fondante della *persistenza Lagrangiana*, ovvero

$$\hat{\Psi}(t_0 + \tau, \mathbf{x}) = \Psi(t_0, \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}) \quad + \quad \mathbf{?}$$

Sarà gran parte della sezione che segue a occuparsi di questo tentativo di modifica allo schema della *persistenza Lagrangiana*, cercando di quantificare matematicamente il termine di G&D.

3.6 Modifiche alla persistenza Lagrangiana

Visti i limiti del metodo d'estrapolazione da eco radar fondato sulla *persistenza Lagrangiana*, limiti associati soprattutto a tre aree d'incertezza, in questa sezione si descrivono due possibili modifiche all'*estrapolazione Lagrangiana pura*, la prima fondata sull'inserimento di un termine che tenga conto dei processi di *crescita e decadimento* della precipitazione, la seconda basata sulla trasformazione delle osservazioni radar prima del loro utilizzo.

3.6.1 L'inserimento di processi di G&D

Considerando un punto dello spazio nel *frame Lagrangiano*, ovvero nel frame mobile, tener conto dei fenomeni di G&D vuol dire aggiungere un termine alla relazione fondante della *persistenza Lagrangiana* introdotta qualche pagina fa,

$$\hat{\Psi}(t_0 + \tau, \mathbf{x}) = \Psi(t_0, \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}) \ ,$$

aggiunta che permetta la mutabilità di Ψ (che può leggersi come Z oppure come R) nel tempo. Questo termine, indicato con S_Ψ, viene chiamato indif-

ferentemente *termine di G&D* oppure *termine di source-sink*, permettendo nascita e distruzione di particelle piovose [41]:

$$\hat{\Psi}(t_0 + \tau, \mathbf{x}) = \Psi(t_0, \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}) + \underbrace{S_\Psi(t_0, \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha})}_{\text{source-sink term}} \tag{3.15}$$

L'aggiunta del termine $S_\Psi(t_0, \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha})$, che si nota essere espresso in coordinate mobili, non rende più verificato l'annullamento della derivata Lagrangiana, per cui risulta $\frac{D\Psi}{Dt} \neq 0$, e cade così l'assunzione principe del metodo.

Perciò, in una visione a posteriori, avendo a disposizione le osservazioni radar, il termine di G&D rappresenta nient'altro che *tutto ciò che non si conserva* con lo scorrere del tempo in coordinate mobili, in quanto se non si conserva, ovvero se

$$\hat{\Psi}(t_0 + \tau, \mathbf{x}) \neq \Psi(t_0, \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}) \ ,$$

è per via dei processi di G&D, che di conseguenza possono essere visti come differenza del valore di Ψ a fissato punto Lagrangiano (ovvero in coordinate mobili):

$$S_\Psi(t_0, \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}) = \hat{\Psi}(t_0 + \tau, \mathbf{x}) - \Psi(t_0, \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}) \ . \tag{3.16}$$

Se il valore di S_Ψ è positivo, allora si sta assistendo alla *growth*, mentre se il suo valore è negativo, siamo di fronte al *decay*. Questa semplice definizione *a posteriori* del termine di G&D permette, osservazioni alla mano, di studiarne l'evoluzione nel tempo. E se si nota qualche forma di predicibilità nella sua evoluzione, si può pensare di provare a predirlo. É quanto fatto ad esempio da Germann e Zawadzki [41], i quali hanno incorporato nella loro procedura di nowcasting un *termine di source-sink* come mostrato nell'equazione (3.15), e ne hanno predetto il valore futuro sulla base dell'evoluzione di esso osservata prima del tempo t_0.

Un importante studio incentrato proprio sul G&D è stato condotto nel 2012 da Radhakrishna *et al.* nell'articolo *Predictability of precipitation from continental radar images. Part V: Growth and decay* [90]. Gli autori conducevano uno studio sulla predicibilità del termine di G&D tramite l'uso della relazione (3.16), studiandone anche la dipendenza dalla scala spaziale. Per ciascun istante temporale discreto t_k, calcolando in ogni singolo punto della griglia spaziale il valore di S_Ψ si perveniva a un vero e proprio campo di *source-sink term*, per cui era possibile studiare l'evoluzione temporale di questo campo con il fine di analizzarne le caratteristiche evolutive. Dallo studio emergeva che il campo di G&D risultava molto

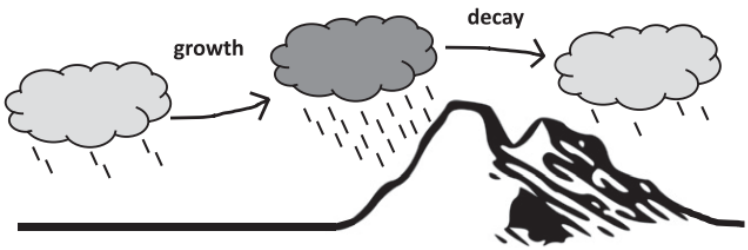


FIGURA 3.7: ***Growth & Decay* su orografia complessa.** Nella figura soprastante [38] viene schematicamente mostrato il processo d'intensificazione della precipitazione in corrispondenza del pendio sopravento, causato dal *lifting orografico*, e la successiva attenuazione al superamento del rilievo montuoso, in corrispondenza del pendio sottovento.

meno persistente del campo di pioggia Ψ, motivando gli scarsi risultati che si erano avuti in studi passati che tentavano di predire la G&D del campo di precipitazione. Specificatamente, gli autori trovarono che i pattern di G&D risultavano persistenti a sufficienza anche fino alle due ore di *lead time*, ma solamente per scale spaziali molto ampie, oltre i 250 km di lunghezza caratteristica.

In più, Foresti *et al.* assumono, in uno studio del Giugno 2019 [38] incentrato sulla predicibilità del G&D della precipitazione, che quest'ultimo risulti più predicibile in regioni montuose, o comunque contraddistinte da orografia complessa, piuttosto che su regioni *piatte* come la parte continentale degli Stati Uniti. Questa convinzione deriva da precedenti studi dello stesso Foresti [37] [39], dai quali emergeva il ridursi della scala spaziale permettente predicibilità se gli studi si compivano su topografia montuosa. La motivazione dietro questo comportamento va cercata nell'evoluzione più sistematica (e quindi più predicibile) che subisce una perturbazione piovosa muovendosi verso un rilievo montuoso: come si vedrà in seguito, la nascita del cosiddetto *forcing orografico* produce sistematicamente un'intensificazione della precipitazione (il *growth*) nel salire della nube lungo il pendio, e una successiva attenuazione di essa (il *decay*) una volta superato il rilievo montuoso (si veda la FIGURA 3.7).

Prima di dettagliare come si possa quantificare il *termine di source-sink*, si sottolinea come i processi di G&D della precipitazione contengano una componente *predicibile*, e una *impredicibile* [38]. In letteratura, la maggior parte dei sistemi di nowcasting per *ensembles* (perciò di tipo *probabilistico*) non provano nemmeno a predire la componente cosiddetta *predicibile*, generando direttamente un insieme di previsioni (*ensemble*

members) stocastiche per giungere a una stima dell'incertezza della previsione. Alcuni illustri esempi di schemi di nowcasting di questo tipo sono il sistema STEPS (*Short-Term Ensemble Prediction System* [20] [102]), il sistema SBMcast (*String of Beads Model for Nowcasting* [14]) e l'estensione stocastica del sistema MAPLE (*McGill Algorithm for Precipitation Nowcasting by Lagrangian Extrapolation* [4]).

Altri metodi, invece, hanno provato a quantificare il G&D inserendo nella *persistenza Lagrangiana* un termine teorico simile al S_Ψ dell'equazione (3.16) e puntando alla previsione della componente *predicibile* del G&D, ma con scarsi risultati (si vedano gli studi di Tsonis e Austin [107], e di Wilson *et al.* [115]).

Terzo approccio, oltre a quello stocastico e a quello teorico, è stato quello basato su tecniche di *machine learning*[6]. Pionieristico in tal senso è stato lo studio pubblicato nel 2000 da Grecu e Krajewski [47], i quali hanno schematizzato il problema della previsione in due step: in primo luogo il calcolo del campo di moto associato all'eco radar, in secondo luogo l'utilizzo di tecniche di *machine learning* per la previsione statistica dei cambiamenti dinamici nella precipitazione (G&D). In particolare, i due autori hanno adottato la tecnica della *rete neurale artificiale* (in inglese *artificial neural network*, abbreviato in ANN), modello computazionale ispirato vagamente alla rete neurale biologica. Nel farlo, sono partiti da un'equazione differenziale discretizzata che, rispetto all'equazione (3.10) relativa al flusso ottico puro, vedeva l'aggiunta di due termini per tener conto dei fenomeni di G&D, risultando la seguente:

$$\frac{\Delta Z_n}{\Delta t} + U\frac{\Delta Z_n}{\Delta x} + V\frac{\Delta Z_n}{\Delta y} = \underbrace{f(\mathbf{a},\, Z_n,\, Z_{n-1},\, \ldots,\, Z_{n-k}) + \tilde{w}}_{\text{termine di } \textit{Growth \& Decay}} \,. \tag{3.17}$$

La funzione $f(\cdot)$ dipende da $\mathbf{a} = (a_1,\, a_2,\, \ldots,\, a_m)$, vettore di m parametri, e da k valori di riflettività misurati agli istanti temporali precedenti, mentre $\tilde{w}$ è un termine che apporta un certo *rumore*. Grecu e Krajewski, modellando la funzione $f(\cdot)$ per mezzo di un Artificial Neural Network con *retropropagazione dell'errore* (in lingua inglese, questo schema ANN

[6] Il termine *machine learning*, traducibile in italiano come *apprendimento automatico*, individua una branca dell'intelligenza artificiale che utilizza metodi statistici per migliorare le performance di un algoritmo nell'identificare pattern nei dati. A tal fine, il *machine learning* raccoglie e utilizza diverse teorie e metodi sviluppati negli ultimi decenni, quali ad esempio la statistica computazionale, il riconoscimento di pattern, il filtraggio adattivo, la teoria dei sistemi dinamici, le reti neurali artificiali e l'elaborazione delle immagini.

prende il nome di *Back Propagation Neural Network*, abbreviato BPNN), conclusero che il beneficio che si otteneva dall'applicazione della complicatissima procedura basata sull'uso delle reti neurali artificiali era troppo ridotto per giustificare l'abbandono di un metodo semplice quale quello della persistenza Lagrangiana pura (si veda l'articolo [47] per ulteriori dettagli).

Alcuni anni dopo, nel 2019, Foresti *et al.* [38] hanno ripreso i passi di Grecu e Krajewski e, disponendo di archivi radar più profondi, hanno usato il *machine learning* (e nello specifico anche loro si sono avvalsi della tecnica dell'*artificial neural network*) per portare il nowcasting oltre l'assunzione di *persistenza Larangiana*, esplorando la dipendenza della predicibilità dei fenomeni di G&D dalla località geografica, dall'ora del giorno, dall'orografia e dalle condizioni del flusso atmosferico.

3.6.2 La trasformazione delle osservazioni

Oltre all'aggiunta di un *termine di source-sink* che tenga conto dei processi di *Growth & Decay* che si verificano durante l'evoluzione di una perturbazione piovosa, un'ulteriore modifica che può applicarsi allo schema classico della *persistenza Lagrangiana* riguarda il campo *osservato*, Ψ. Difatti, alcuni studi hanno dimostrato che delle modifiche al campo direttamente osservato possono migliorare il nowcast. Bellon e Zawadzki, ad esempio, hanno mostrato in uno studio del 1994 [12] che eliminare le informazioni su piccola scala tramite l'operazione di media spaziale può portare a un notevole miglioramento della previsione. Si tratta, in sostanza, di applicare un *filtro spaziale*, tecnica ripresa anche in studi successivi come ad esempio in quello condotto nel 2001 da Seed e Keenan [101], in cui l'uso di un *filtro di Fourier* decomponeva l'osservazione Ψ a seconda della scala, e faceva avvezione delle informazioni di ciascuna scala secondo la specifica predicibilità ad essa associata.

Perciò, con questa modifica aggiuntiva la Ψ dell'equazione (3.15) si carica del peso di una tilde, cambiando leggermente la veste grafica ma assumendosi l'onere di qualsiasi trasformazione sia stata compiuta sul campo direttamente osservato:

$$\underbrace{\hat{\Psi}(t_0+\tau,\,\mathbf{x})}_{\text{previsione}} = \underbrace{\tilde{\Psi}(t_0,\,\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha})}_{\text{osservazione trasformata}} + \underbrace{S_\Psi(t_0,\,\mathbf{x}-\boldsymbol{\alpha})}_{\text{source-sink term}} \tag{3.18}$$

In questo studio di tesi si utilizzerà il metodo di estrapolazione adottando la *persistenza Lagrangiana* nella sua forma originale, senza considerare i

fenomeni di G&D della precipitazione e senza operare trasformazioni sul campo direttamente osservato Ψ.

Capitolo 4

Il calcolo del campo di avvezione

4.1 Introduzione al capitolo

Come ripetutamente promesso nella sezione sulla *persistenza Lagrangiana* all'interno del capitolo precedente, questo capitolo sarebbe stato dedicato all'approfondimento della tematica *campo di moto*. Perché sapere come si sta muovendo l'eco radar contestualmente alla sua osservazione è importante non solo ai fini della previsione tramite *estrapolazione Lagrangiana*, ma anche ai fini della *previsione per analoghi*, metodologia che verrà trattata nel prossimo capitolo. Perciò, ponendo l'argomento del calcolo del campo di velocità tra i due utenti finali, si spera di non fare torno a nessuno.

Ripartendo dall'equazione fondante della *persistenza Lagrangiana*, nella prima sezione si descriverà il calcolo del campo di moto mediante la *tecnica del flusso ottico*, il cui nome deriva dalla similitudine con una particolare modalità di percezione visiva negli animali, uomo compreso. In seguito, nella seconda sezione ci si addentrerà nelle tecniche di *area tracking*, due delle quali saranno utilizzate per gli scopi di questo studio di tesi. Infine, nella sezione conclusiva si parlerà brevemente delle tecniche di *cell tracking* le quali, intervenendo su fenomeni prettamente convettivi, non saranno degnate di grosse attenzioni.

Per lo sviluppo di questo capitolo si è fatto riferimento principalmente al già citato studio di Germann e Zawadzki del 2002 intitolato *Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology* [41] e alla pubblicazione del 2008 di Maarten Reyniers intitolata *Quantitative Precipitation Fore-*

casts based on radar observations: principles, algorithms and operational systems [91].

4.2 La tecnica del flusso ottico

Per cominciare a parlare di *campo di moto*, ovvero di quel campo vettoriale costituito da un numero finito di vettori velocità $\mathbf{v_m}(\mathbf{x_m})$, uno per ogni singolo pixel m-esimo del pattern di riflettività prodotto dall'eco radar al tempo t_0, e relativo al centro del pixel, individuato dalle coordinate $\mathbf{x_m} = (x_m, y_m)$, ci si riaggancia al paragrafo intitolato *Il calcolo del campo di moto* all'interno della sezione *La Persistenza Lagrangiana*, contenuta nel precedente capitolo. E con esso, si fa nuovamente riferimento all'equazione (3.11), che qui si riporta per comodità:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla Z = 0 \ . \tag{4.1}$$

Sembra che possa essere questa l'equazione adatta per fornire il campo di velocità $\mathbf{v}(x, y)$, in quanto esso rappresenta l'unica incognita al suo interno. La difficoltà sta nella *indeterminazione* del problema, avendo a disposizione una sola equazione nelle due incognite (u, v).

Allora, prima di provare a rendere *determinato* il sistema con l'aggiunta di altre equazioni, si concentra l'attenzione sull'equazione (4.1) appena riscritta, delineandone brevemente la storia.

4.2.1 Dalla psicologia al processamento d'immagini

In letteratura scientifica, l'equazione appena scritta viene detta *equazione del flusso ottico*, anche se spesso si trova indicata come *equazione dell'optical flow* usando direttamente la dicitura inglese.

Il concetto dell'*optical flow* nasce in ambito psicologico dagli studi di James Jerome Gibson (1904–1979), uno psicologo americano che in un articolo del 1950 introdusse il concetto di *optical flow* per descrivere lo stimolo visivo fornito agli animali – uomo compreso – per muoversi efficacemente nel mondo [43]. L'*optical flow* rappresenta una modalità di percezione visiva del movimento degli oggetti relativamente alla posizione del soggetto osservante, e viene elaborata a livello corticale comparando diversi parametri quali la velocità, l'intensità di luce, la posizione del corpo e della testa. Si tratta, per esempio, del moto *apparente* di un pattern luminoso che *sembra* muoversisi quando l'osservatore, sia esso un obiettivo di una cinepresa o un occhio umano, è in movimento [51]. Infatti, come dice il

nome si tratta di un *flusso* ottico prodotto dal cervello, e una sua palpabile conseguenza è, per esempio, quello che accade dopo una lunga piroetta, quando si ha la visione dell'ambiente circostante che continua a *girare* pur essendosi ormai fermati[1].

Il concetto di *optical flow* è in seguito uscito dall'ambiente della psicologia, ispirando il campo informatico, nello specifico l'ambito della *rappresentazione digitale di immagini.* Infatti, sequenze ordinate di immagini permettono la stima del moto producendo due possibili risultati: o il campo di velocità istantaneo associato a un'immagine, o il campo di spostamenti discreti [10]. Se si tratta del campo di velocità, tipicamente questo viene rappresentato da vettori che si originano da ogni singolo pixel di un certo frame di riferimento, e puntano verso la posizione di pixel *omologhi* (ovvero caratterizzati dalla medesima *intensità*) all'interno del frame successivo (si veda l'esempio in FIGURA 4.1). Tuttavia, poiché per il calcolo del campo di moto tramite *optical flow* si utilizzano frame relativi a tempi *discreti*, separati da un Δt finito e non infinitesimo, il campo delle velocità risultante non rispecchia il vero campo di velocità *istantaneo*, ma rappresenta un campo di moto *medio.*

4.2.2 Il problema del flusso ottico

Per definire in modo più rigoroso il *problema dell'optical flow* s'introduce I, la generica grandezza associata al singolo pixel (nel presente lavoro questa sarà la riflettività Z oppure l'intensità di pioggia R, tradotte in uno specifico colore). Si consideri di avere due immagini relative a due tempi successivi, $I(x, y, t_0)$ e $I(x, y, t_0 + \Delta t)$, come ad esempio mostrato semplicisticamente nella FIGURA 4.2.
Ai fini della stima del campo di moto associato all'immagine al tempo t_0, occorre risolvere il *problema di corrispondenza* dei pixel tra le due immagini: dato un pixel appartenente a $I(x, y, t_0)$, occorre cercare nell'immagine successiva $I(x, y, t_0 + \Delta t)$ un pixel dello stesso colore che sia dislocato nelle vicinanze del pixel di riferimento. Le assunzioni dietro al *problema di corrispondenza* sono le seguenti:

[1]Nel suo articolo [43], Gibson sottolineava fortemente l'importanza dell'*optical flow* anche nel partecipare a quell'abilità umana (ma anche animalesca) chiamata *percezione dell'affordance*, ovvero l'abilità di discernere intuitivamente le possibilità di azione che un oggetto o un ambiente permettono. Un oggetto con alta *affordance* invita fortemente l'osservatore a un suo utilizzo intuitivo, dettato dalla sua forma. Ad esempio, una caraffa d'acqua permette a un osservatore d'intuirne immediatamente l'uso grazie al suo manico laterale e al suo beccuccio sporgente, perciò possiede alta *affordance.*

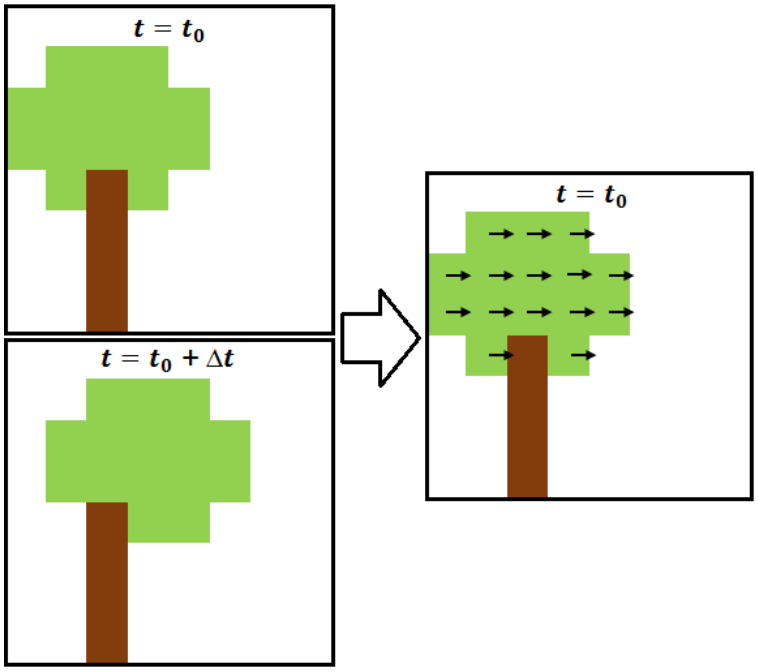


FIGURA 4.1: **Esempio di flusso ottico.** Nell'immagine soprastante viene mostrato un semplicissimo esempio di calcolo del campo di moto tramite *optical flow*. Il frame superiore rappresenta un albero al tempo $t = t_0$, mentre il frame inferiore inquadra la medesima scena ma a un istante successivo $t = t_0 + \Delta t$, con la chioma dell'albero mossa dal forte vento verso destra. Sulla base dei due frame, l'*optical flow* riesce, tracciando lo spostamento dei singoli pixel nel passaggio dal primo al secondo frame, a calcolare il vettore velocità per ciascuno dei pixel del frame iniziale, ottenendo il campo di moto che ha permesso il passaggio dall'uno all'altro.

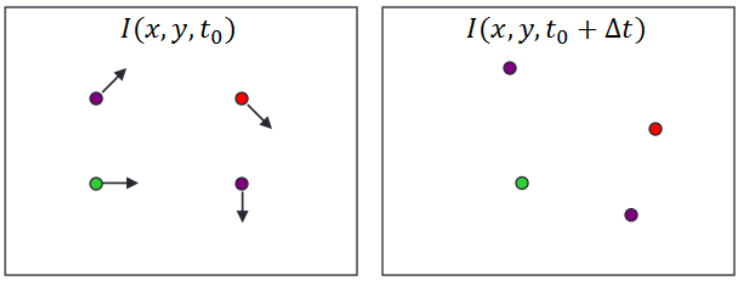


FIGURA 4.2: **Esempio di *optical flow*.** In figura, una stessa scena costituita da soli quattro pixel viene catturata al tempo t_0 e, dopo un tempo finito Δt, al tempo $(t_0 + \Delta t)$. Gli spostamenti dei quattro pixel permettono di determinare il campo di velocità medio [16].

1 – **Costanza di colorazione**: un pixel in $I(x, y, t_0)$ mantiene lo stesso colore (ovvero la stessa intensità) in $I(x, y, t_0 + \Delta t)$, ma modifica la sua posizione. Matematicamente, questo vincolo può essere reso tramite la relazione

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x,\, y + \Delta y,\, t + \Delta t)$$

2 – **Piccoli spostamenti**: i pixel non si muovono molto, restando nelle circostanze. Questo vincolo si traduce nella possibilità di utilizzare un'espansione di Taylor per legare spazialmente un pixel $I(x, y)$ che si sposta in $I(x+\Delta x, y+\Delta y)$, trascurando i termini di ordine superiore al primo:

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y) \simeq I(x, y) + \frac{\partial I}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial I}{\partial y}\Delta y \ .$$

Utilizzando l'equazione del secondo vincolo in quella del primo, quest'ultima può riscriversi come

$$I(x, y, t) \simeq I(x, y, t + \Delta t) + \frac{\partial I}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial I}{\partial y}\Delta y \ . \tag{4.2}$$

Chiamando $\mathbf{v} = (u, v)$ il campo delle velocità, con (u, v) le sue componenti rispettivamente lungo x e lungo y, le variazioni spaziali Δx e Δy possono esprimersi come prodotto di velocità e Δt:

$$\Delta x = u\,\Delta t$$
$$\Delta y = v\,\Delta t$$

Sostituendo queste espressioni e denominando

$$\Delta I = I(x, y, t + \Delta t) - I(x, y, t) \ ,$$

l'equazione (4.2), dopo aver diviso per la quantità Δt, assume la seguente forma:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v \simeq 0 \ . \tag{4.3}$$

Pensando a una variazione infinitesima, si può sostituire il rapporto $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ con la corrispondente derivata parziale di I nel tempo, $\frac{\partial I}{\partial t}$, ottenendo

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v \simeq 0 \ ,$$

forma che, pensando a u e v come alle due componenti del vettore velocità $\mathbf{v} = (u, v)$ e facendo uso dell'operatore nabla, può riscriversi nel seguente modo:

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla I \simeq 0 \ , \tag{4.4}$$

Quest'ultima equazione (4.4) coincide esattamente con l'equazione (4.1), eccetto per il fatto che in questo caso una generica grandezza I si sostituisce alla riflettività radar Z. Ecco, perciò, provato che l'equazione (4.1), equazione che rappresenta e definisce la *persistenza Lagrangiana*, coincide esattamente con l'equazione del *flusso ottico*, e di conseguenza può essere risolta guardando alla risoluzione del problema del flusso ottico.

4.2.3 Il problema dell'apertura

Descritta l'origine dell'equazione che governa l'*optical flow*, come si era accennato in corrispondenza dell'ottenimento dell'equazione (4.1), ci si trova di fronte a un problema non determinato: una sola equazione nelle due incognite (u, v), lasciando spazio a infinite possibili soluzioni. Per fornire una spiegazione intuitiva in merito a ciò che l'equazione del flusso ottico permette di conoscere e ciò che invece resta indeterminato, si riscrive l'equazione (4.4), focalizzando l'attenzione sul secondo termine:

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \underbrace{\mathbf{v} \cdot \nabla I}_{?} = 0 \ .$$

Sottolineando che il vettore ∇I è, per definizione di *gradiente*, normale alle superfici a $I = cost$, si indica con $v_{//}$ la componente del vettore $\mathbf{v}$ parallela al ∇I, e con $v_{\perp}$ quella a lui perpendicolare, come mostrato in FIGURA 4.3. Sapendo che il prodotto scalare tra due vettori fornisce una quantità scalare pari al prodotto dei moduli dei due vettori per il coseno dell'angolo tra essi compreso, il termine

$$\mathbf{v} \cdot \nabla I$$

genera una quantità scalare pari, stando alla definizione appena fornita e indicando con α l'angolo compreso tra i due vettori, a

$$\mathbf{v} \cdot \nabla I = \|\nabla I\| \cdot \underbrace{\|\mathbf{v}\| \cos(\alpha)}_{v_{//}} \ .$$

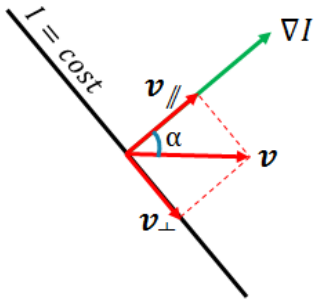


FIGURA 4.3: **Vettore velocità e vettore ∇I nel flusso ottico.** In figura è tracciato il vettore ∇I, per definizione perpendicolare alla superficie a $I = cost$, e il generico vettore velocità $\mathbf{v}$, con le sue componenti parallela ($v_{//}$) e perpendicolare ($v_{\perp}$) al gradiente di I.

Come indicato, il prodotto ($\|\mathbf{v}\| \cos(\alpha)$) altro non è che la componente $v_{//}$, per cui l'equazione del flusso ottico può riscriversi come segue:

$$\frac{\partial I}{\partial t} + v_{//} \, \|\nabla I\| = 0 \ . \tag{4.5}$$

Poiché il campo I è noto, si è di fronte a un'equazione nella sola incognita $v_{//}$, che può essere così calcolata utilizzando l'equazione (4.5). Questo risultato decreta che del vettore velocità $\mathbf{v}$:

- $v_{//}$, la componente parallela al ∇I, è *determinata* univocamente dall'equazione del flusso ottico;

- $v_{\perp}$, la componente perpendicolare al ∇I, è *indeterminata*, potendo così assumere qualsiasi possibile valore.

L'indeterminazione della componente $v_{\perp}$ costituisce il cosiddetto *problema dell'apertura* (in lingua inglese, *aperture problem*) [16]. Come mostrato in FIGURA 4.4, poniamo di avere uno spigolo in movimento, ovvero una linea che si muove secondo un certo vettore velocità $\mathbf{v}$ sconosciuto. Questo spigolo viene osservato attraverso una parete con un foro circolare: l'*apertura*. Allora, per l'osservatore al di qua della parete, lo spigolo può muoversi secondo un qualsiasi vettore velocità, ma una cosa gli sarà ben nota: la componente di velocità normale allo spigolo, ovvero la $v_{//}$. Questo lo porterà a decretare che il movimento dello spigolo sia proprio nella direzione normale allo spigolo stesso, in quanto la limitata apertura non gli permetterà di avere una visione d'insieme, e l'effetto ottico gli farà credere che il moto sia proprio nella direzione di $v_{//}$, quando in realtà, come mo-

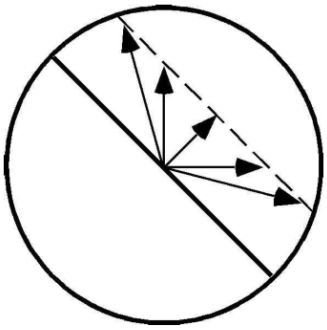


FIGURA 4.4: **Il problema dell'apertura con un foro.** Nell'immagine, uno spigolo in moto è osservato attraverso un'apertura circolare in una parete. Qualsiasi sia la direzione reale del vettore velocità associato allo spigolo, un osservatore al di qua della parete ne può cogliere solamente la componente perpendicolare allo spigolo stesso, eleggendo quest'ultima a direzione del moto dello spigolo, e dando vita a un effetto ottico detto *problema dell'apertura*.

strato in FIGURA 4.4, è infinito il numero di possibili vettori velocità che possano giustificare il moto dello spigolo [70].

Un altro esempio del *problema dell'apertura* è in FIGURA 4.5: il movimento di un tavolo romboidale è osservato dall'alto attraverso una parete con quattro aperture circolari. Il moto del tavolo è verso destra, ma il movimento di ciascuno dei quattro spigoli di tavolo visibili è percepito differentemente a seconda dell'apertura scelta, e non coincide con il reale movimento del tavolo, bensì risulta normale all'orientazione dello spigolo considerato.

Quest'effetto ottico è, in origine, di tipo *geometrico*, in quanto dipende strettamente dall'apertura concessa all'osservatore e dal tipo di geometria visibile attraverso essa. Infatti, se si tratta di un semplice *spigolo* che impegna l'apertura da parte a parte, l'assenza di altre forme al di fuori di una linea retta non permette di identificare con esattezza la direzione del moto, producendo quest'ambiguità e ingannando il cervello.

Tuttavia, se al di là dell'apertura fosse presente una geometria più complessa, come ad esempio un *angolo* di un tavolo, il moto di quest'ultimo sarebbe univocamente determinabile, perdendo qualsiasi ambiguità. Il motivo di ciò dipende dall'assenza di punti di riferimento specifici da poter seguire nel caso di *spigolo* che impegna l'apertura da parte a parte, ma se ad esempio si tratta di uno *spigolo vivo* o di un'*estremità* di un'asta (come mostrato nell'esempio in FIGURA 4.6), la comparsa di un punto di riferimento localizzato elimina qualsiasi dubbio.

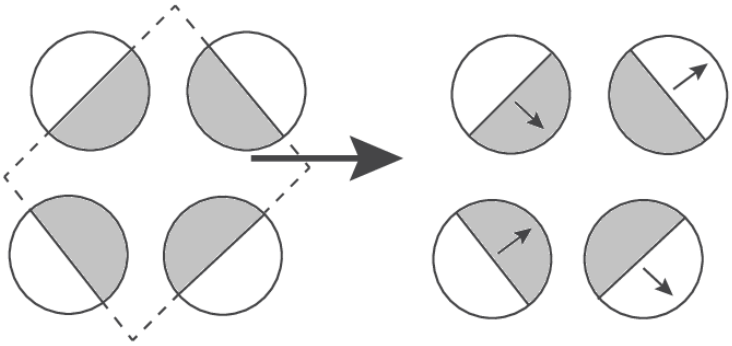


FIGURA 4.5: **Il problema dell'apertura con quattro fori.** Nell'immagine di sinistra, quattro fori in una parete permettono di osservare un oggetto di forma romboidale che si muove parallelamente alla parete, verso destra. Dai fori sono visibili esclusivamente gli spigoli dell'oggetto. Nell'immagine di destra, invece, è rappresentata la percezione del moto degli spigoli dal punto di vista di un osservatore al di qua della parete. Ogni spigolo si muove sì verso destra, ma al contempo sembra avere una componente di movimento verso l'alto o verso il basso che l'oggetto romboidale non possiede, dando vita a un movimento apparente complessivo che risulta perpendicolare allo spigolo considerato [103].

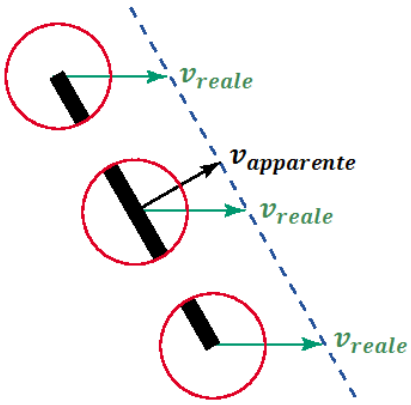


FIGURA 4.6: **Asta in moto e problema dell'apertura.** Nell'immagine, un'asta trasla secondo la direzione indicata dai vettori verdi. Una parete con tre aperture circolari si frappone tra l'asta e l'osservatore, dando vita a tre possibili scenari: quello relativo al foro centrale, che genera il tipico *problema dell'apertura*, e quelli in alto e in basso che, presentando solo le estremità dell'asta, permettono invece di determinarne univocamente il moto [73].

Descritto il *problema dell'apertura* nel campo delle neuroscienze, si comprende come l'equazione (4.1) possa essere associata a questo tipo di problema. Perché, come l'occhio umano è sensibile alla sola componente di velocità $v_{//}$ di un spigolo in moto oltre un'apertura (con annesso inganno ottico), così l'equazione (4.1) permette di conoscere esclusivamente la componente $v_{//}$ del vettore $\mathbf{v}$, lasciando indeterminata la componente $v_{\perp}$.

4.2.4 L'aggiunta di OFC

Perché l'equazione del flusso ottico possa fornire un'informazione completa sul moto, occorre abbinarla ad altre equazioni che impongano ulteriori condizioni sul campo di velocità. In letteratura scientifica, questo problema viene chiamato indistintamente *problema del flusso ottico* o *problema dell'apertura*, e le relazioni aggiuntive atte a chiudere il sistema vengono spesso chiamate *Optical Flow Constraints* (abbreviato in *OF Constraints*, o direttamente OFC), sottolineando il loro utilizzo come *vincoli* (in lingua inglese *constraints*) che rendano *determinato* il problema del flusso ottico, riducendo le infinite soluzioni a un'unica soluzione.

Negli anni si sono avvicendati diversi studi per risolvere il problema del flusso ottico, proponendo differenti tipologie di relazioni aggiuntive. Guardando ai differenti vincoli spaziali imposti dagli OFCs, i modelli di *optical flow* possono classificarsi in due grosse categorie: modelli *locali* (anche detti *differenziali*) e modelli *globali* (altrimenti detti *variazionali*) [8]. I modelli *locali* applicano OFCs solamente su piccole aree dell'immagine, mentre quelli *globali* sull'intera estensione di essa. Sono stati Bowler *et al.* [19] a introdurre il primo algoritmo di *optical flow locale* con lo scopo del nowcasting della precipitazione, dando in seguito vita ai sistemi di nowcasting operativi STEPS [20] e STEPS-BE [36]. Esempi di modelli *globali* di *optical flow*, invece, sono ad esempio quelli utilizzati per il sistema operativo di nowcasting di Hong Kong, lo SWIRLS [117].

Oltre alle due macro-categorie di modelli *globali* e *locali*, esistono tentativi di modelli *orientati* [74], nei quali le OFCs sono *direzionali*. Questi modelli sono pensati principalmente per eliminare le problematiche dei modelli globali di fronte a discontinuità spaziali nell'immagine.

Tipicamente, le *OF Constraints* sono pensate con l'obiettivo di rendere *armonioso* e senza bruschi salti il campo di moto (in inglese questa proprietà viene resa con il termine *smoothness*), e così facendo non solo si evita di ottenere vettori velocità vicini in direzione fortemente diversa, ma si persegue anche il fine ultimo, quello di aggiungere delle equazioni di vincolo che permettano di rendere univoca la soluzione del sistema. Tra

le diverse soluzioni adottate in letteratura, se ne presentano tre tra le più spesso utilizzate [91]:

1 – **Minimizzazione di una *cost function*:** l'idea è quella di trovare il vettore $\mathbf{v}$ per un certo pixel imponendo quello stesso vettore anche ai pixel vicini, con l'assunzione che pixel vicini debbano avere associati vettori velocità molto simili, al più uguali, perseguendo così la *smoothness* locale del campo delle velocità. Questo comporta la scrittura di tante equazioni del flusso ottico per un singolo pixel, una per ogni pixel vicino, ripetendo l'operazione su tutti i pixel dell'immagine. Dall'avere un sistema *indeterminato* si arriva ad averne uno *sovradeterminato*, con più equazioni rispetto al numero delle incognite. La minimizzazione di una *funzione di costo* estesa ai dintorni Ω del pixel considerato permette di determinare la coppia di (u, v) migliore nel rispetto del vincolo di *smoothness* [86].

   La funzione di costo può assumere una forma del tipo

$$C = \sum_{\Omega} w(x, y) \cdot \left(\frac{\partial Z}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla Z \right)^2 ,$$

   dove $w(x, y)$ rappresenta una *funzione-peso*, dipendente dalle coordinate dei pixel nei dintorni del pixel considerato. Questa funzione assegna una maggiore influenza ai più centrali dei pixel vicini, rendendo meno importanti quelli perimetrali [67].
   Il metodo denominato *Lukas-Kanade* [66] (dal nome dei suoi sviluppatori) costituisce un importante esempio, in ambito meteorologico e non, di metodo di calcolo dell'*optical flow* tramite l'imposizione della condizione di *smoothness* a livello locale mediante la minimizzazione di una funzione di costo, in modo tale da produrre un campo di moto complessivo che sia il più possibile armonioso, senza evidenti variazioni brusche nei vettori velocità vicini [59].

2 – **Minimizzazione del laplaciano:** con questa filosofia, spesso usata all'interno dei modelli *globali*, l'equazione aggiuntiva che viene utilizzata è il *laplaciano* del vettore $\mathbf{v}$, ovvero $\nabla^2\mathbf{v}$, che si punta a minimizzare. Questa imposizione si traduce nella minimizzazione contemporanea del laplaciano delle singole componenti del vettore

velocità, u e v:

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$
$$\nabla^2 v = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \ .$$

L'operazione di minimizzazione, imposta su ogni singolo pixel al fianco dell'equazione del flusso ottico, permette ancora una volta di perseguire la *smoothness* del campo di moto. Un sistema di nowcasting che utilizza questo metodo per risolvere l'*optical flow* è il sistema GANDOLF [19].

3 – **Minimizzazione della divergenza:** questa volta la minimizzazione avviene sulla *divergenza* del vettore velocità $\mathbf{v}$, ovvero sulla quantità

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \ .$$

Con questa minimizzazione applicata assieme all'equazione del flusso ottico su ogni singolo pixel dell'immagine, si perviene a un campo di moto che, ancora una volta, presenta caratteristiche di *smoothness*. Una tecnica di questo tipo, anche se nell'ambito delle tecniche di *area tracking* (si veda sezione successiva) è utilizzata, ad esempio, nell'algoritmo chiamato COTREC [60].

Sebbene, come indicato negli esempi in calce a ciascuno dei tre metodi sopra elencati, esistano diverse tecniche di nowcasting che fanno uso di algoritmi basati sull'*optical flow* per il calcolo del campo di moto, tuttavia spesso queste tecniche portano a campi di moto erronei e caratterizzati da rumore [91].

É per questo motivo che, principalmente nel campo della previsione della precipitazione, si è assistito allo sviluppo di altre tecniche per l'ottenimento del campo di velocità. Sono due i filoni maggiormente studiati in letteratura: quello dei metodi di *area tracking*, e quello dei metodi di *cell tracking* (anche detti di *centroid tracking*).

4.3 La tecnica dell'area tracking

Questa tecnica è simile a quella dell'*optical flow*, in quanto, come dice il nome, viene fatto il *tracking* – ovvero l'*inseguimento* – di porzioni di imma-

gine, ma queste porzioni non coincidono con i singoli pixel come nei modelli basati sull'*optical flow*. Infatti si tiene traccia degli spostamenti di intere *aree*, ovvero insiemi di pixel, derivanti dalla suddivisione dell'immagine per mezzo di una griglia regolare. Per ogni area selezionata, un'area omologa, tipicamente individuata sulla base del criterio della *massima correlazione*, viene cercata nell'immagine successiva, definendo un campo di velocità e di spostamenti.

4.3.1 Il campo di moto uniforme

Il primo pionieristico algoritmo di *area tracking* si deve a uno studio di Hilst e Russo [50], e si fondava sull'idea di modellare il movimento tra due immagini consecutive tramite un unico vettore spostamento che, individuato secondo il criterio della *massima correlazione* tra le due immagini, traslasse rigidamente l'eco radar. Si trattava, dunque, di spostare l'intera immagine secondo quel vettore che, *mediamente*, assecondasse al meglio gli spostamenti dei singoli pixel nel senso della massima correlazione.

Per quanto formalmente sia fondata su un'idea semplice, la tecnica del *campo di moto uniforme* può comunque annoverarsi tra le tecniche di *area tracking*, con la particolarità di lavorare con un'unica area, coincidente con l'intera immagine. Tuttavia, assumendo che l'avvezione sia uniforme nello spazio (oltre che nel tempo, ma questa sarà un'assunzione comune a quasi tutte le tecniche di nowcasting), questa tecnica conduce a un errore che, a meno che non si tratti di un campo di moto reale effettivamente vicino all'essere costante, può risultare non trascurabile [90].

Si sottolinea che il *campo di moto uniforme* sarà uno dei due tipi di campo di moto che saranno utilizzati per le finalità di questo lavoro di tesi (il secondo sarà quello prodotto dall'*algoritmo VET*, descritto qualche paragrafo più avanti, all'interno di questa stessa sezione).

4.3.2 L'algoritmo TREC

Il naturale passo successivo fu quello di suddividere l'immagine in tante aree, calcolando un vettore spostamento per ciascuna di esse. La prima implementazione si deve a Rinehart e Garvey [93], che nel 1978 diedero vita all'algoritmo TREC, acronimo di *Tracking Radar Echoes by Correlation*. In FIGURA 4.7 viene illustrato il concetto alla base di quest'algoritmo di *area tracking*, concetto che rappresenta il fondamento di quasi tutti gli algoritmi di *area tracking* sviluppati dopo l'introduzione del TREC.

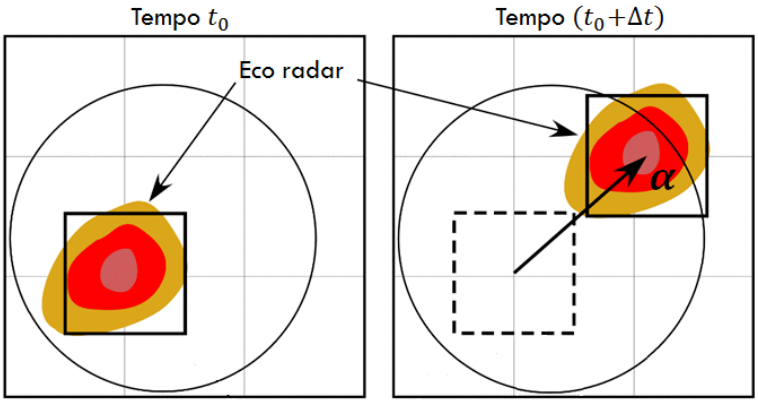


FIGURA 4.7: **Schema dell'algoritmo TREC.** Nelle due immagini soprastanti viene schematizzato il funzionamento dell'algoritmo di *area tracking* chiamato TREC. Nella figura di sinistra viene mostrato l'eco radar al tempo t_0, posizionato su di una griglia determinante la risoluzione spaziale dei vettori spostamento. Attorno a ciascun punto di griglia viene definita un'area da inseguire, come ad esempio quella tracciata nell'immagine. Per ciascuna delle aree al tempo t_0 viene calcolata la *correlazione* con tutte le aree dell'immagine al tempo successivo $(t_0 + \Delta t)$, rappresentato dalla figura sulla destra. La coppia che produce la correlazione massima determina il vettore spostamento e il vettore velocità per ciascuna delle aree selezionate al tempo t_0.

La procedura alla base del TREC, tuttavia, porta a campi di velocità spesso pieni di *rumore*, con vettori velocità erronei e caratteristiche divergenti del campo. Per questo motivo, algoritmi di *area tracking* sviluppati successivamente hanno puntato a migliorare la bontà del risultato introducendo principalmente elementi di *smoothness*.

4.3.3 L'algoritmo COTREC

Questo è stato fatto, ad esempio, da un'evoluzione del TREC, il COTREC [60] (*COntinuity of TREC vectors*), riprocessando il campo di moto prodotto dal TREC con il vincolo aggiuntivo della minimizzazione della divergenza di $\mathbf{v}$. I risultati sono apparsi significativamente migliori rispetto a quelli prodotti dal TREC puro.

Un'ottimizzazione ulteriore del COTREC si deve a Mecklenburg [71] che, nel suo studio del 2000, dopo averlo verificato e qualificato attraverso diversi indici di qualità, ne ha migliorato la bontà soprattutto attraverso una procedura di *smoothing* spaziale applicata sulle immagini prima ancora di calcolare la correlazione tra le aree.

4.3.4 L'algoritmo VET

Un importante algoritmo basato sulla tecnica dell'*area tracking* è il *Variational Echo Tracking*, spessissimo abbreviato con l'acronimo VET. Quest'algoritmo, ideato da Laroche e Zawadzki nel 1994 [57], prende spunto da uno studio di Wahba e Wendelberger del 1980 [113].

Inizialmente la tecnica fu sviluppata con il fine di calcolare il campo di vento in tre dimensioni sulla base degli echi provenienti da un radar Doppler a singola antenna (il cosiddetto *single-Doppler radar*) [57], per poi approfondire lo studio solamente sui venti orizzontali, rendendo bidimensionale la tecnica [58].

In seguito la tecnica fu adattata allo studio dei campi di precipitazione descritti da pattern radar compositi, senza alcuna informazione di tipo Doppler, con lo scopo di ottenere il campo di moto associato a un certo campo di riflettività radar. Sono stati Germann e Zawanzki [41] a compiere quest'adattamento all'interno del pluricitato articolo del 2002 in cui, con l'intenzione di studiare la dipendenza della predicibilità dalla scala spaziale, hanno sviluppato il VET applicato al nowcasting della precipitazione.

L'algoritmo richiede una discreta sequenza di operazioni, presentate nell'elenco che segue:

1. Si selezionano due immagini successive contenenti il campo di riflettività radar ai tempi t_0 e $(t_0 - \Delta t)$;

2. Si suddividono le immagini in un certo numero di aree di dimensione opinabile, ottenendo un grigliato uniforme (m x n);

3. Si definisce una *cost function* che, minimizzata, fornisca presumibilmente l'andamento del moto dell'intero eco radar attraverso la generazione di vettori $\mathbf{v}_{m,n}$, uno per ciascuna area di coordinate (m, n). La *cost function* si compone di due termini e, utilizzando la generica grandezza di campo Ψ rappresentante una qualche variabile relativa alla precipitazione (tipicamente $\Psi \equiv Z$), assume la forma che segue:

$$J_{\mathrm{VET}}(\mathbf{v}) = J_{\Psi} + J_2 \ .$$

Il termine J_{Ψ} rappresenta, seguendo il dettame della *persistenza Lagrangiana*, il vincolo sulla conservazione del valore complessivo del campo Ψ all'interno del dominio Ω, e perciò viene calcolato sommando il quadrato dei residui dell'equazione fondante della *persistenza Lagrangiana* (si veda l'equazione (3.5) all'interno della sezio-

ne *La Persistenza Lagrangiana*, nel capitolo *I metodi di estrapolazione*), residui che, in un'altra visione, rappresentano il *termine di source-sink*, e stimano il *Growth & Decay* presente (si veda la sezione *Modifiche alla persistenza Lagrangiana* all'interno del capitolo citato nella parentesi chiusa qualche riga fa). In forma integrale, il J_Ψ può esprimersi come [41]

$$\iint_\Omega \beta(\mathbf{x}) \Big(\Psi(t_0, \mathbf{x}) - \Psi(t_0 - \Delta t, \mathbf{x} - \mathbf{v}\Delta t)\Big)^2 d\Omega \ ,$$

con $\mathbf{v}\Delta t$ che rappresenta il vettore spostamento $\boldsymbol{\alpha}$. Si nota che il vettore $\mathbf{v}$, pur rappresentando l'incognita, viene definito volta per volta per ogni singolo tentativo di spostamento del campo Ψ, misurando per ciascuno di essi il residuo complessivo. La funzione $\beta(\mathbf{x})$, posta a moltiplicare il quadrato del residuo, rappresenta una funzione *peso* che, a seconda del punto $\mathbf{x} = (x, y)$, quantifica la qualità (e quindi l'affidabilità) dell'osservazione in base al campo d'errore noto del dato radar, ponderando il residuo in un certo punto $\mathbf{x} = (x, y)$ sulla base dell'errore contenuto in quel punto. In questo modo, alle osservazioni su zone con frequente *clutter* o con poca visibilità viene data poca importanza.
La J_Ψ può esprimersi anche in forma discreta sostituendo l'integrale con la sommatoria e, esplicitando le componenti del vettore posizione $\mathbf{x}$ e del vettore velocità $\mathbf{v}$, si ottiene [13]

$$\sum_x \sum_y \beta(x, y) \Big(\Psi(t_0, x, y) - \Psi(t_0 - \Delta t, x - u\Delta t, y - v\Delta t)\Big)^2 \Delta x \Delta y \ .$$

Ma il termine J_Ψ non è l'unico da dover minimizzare. Infatti la *cost function* presenta anche il termine J_2 che, ispirato a uno studio di Wahba e Wendelberger [113], introduce una componente di *smoothness* che permette di smorzare le brusche variazioni tra vettori velocità vicini (quelle che si ottengono se si prova a minimizzare esclusivamente la funzione J_Ψ), limitando la variabilità nello spazio del generico vettore $\mathbf{v}_{m,n}$ associato a una certa area (m, n). Detta

smoothness-penalty function, la funzione J_2 può esprimersi come [41]

$$J_2 = \gamma \iint_\Omega \left(\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}\right)^2 + \right.$$
$$\left. + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}\right)^2 \right) d\Omega \ ,$$

con γ che rappresenta una costante. Ancora una volta, passando dalla forma integrale a quella discreta, si può scrivere la J_2 utilizzando una doppia sommatoria [13]:

$$J_2 = \gamma \sum_x \sum_y \left(\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}\right)^2 + \right.$$
$$\left. + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}\right)^2 \right) \Delta x \Delta y \ ;$$

4. Si procede alla minimizzazione della funzione di costo. Questa non avviene per ogni singola area, ma globalmente, per cui le componenti (u, v) di ogni singolo vettore associato a ciascuna area sono ottenute simultaneamente minimizzando la funzione J_Ψ.
Sono possibili una grande varietà di metodi per operare la minimizzazione, ma tipicamente il più utilizzato consiste nel calcolo del gradiente della funzione di costo, ∇J_Ψ, funzione delle stime di $\mathbf{v}_{m,n}$, con il fine di determinare la direzione ottimale lungo cui ritentare le ipotesi dei vettori velocità. Occorrono diverse iterazioni perché si giunga alla minimizzazione dell'intera *cost function* (anche un centinaio), e in VET viene utilizzato l'*algoritmo del gradiente coniugato* [76] per determinare la direzione di ricerca ottimale e la lunghezza dello spostamento lungo essa;

5. Si perviene al minimo della funzione J_Ψ: il campo di moto corrispondente all'ultimo tentativo sarà il campo di moto definitivo.

Come sottolineano Germann e Zawadzki, il campo di velocità ottenuto coinvolge l'intera immagine, comprese le zone senza eco radar. E se da un lato risulta molto affidabile nelle aree in cui c'è precipitazione, al contrario deve essere interpretato con prudenza nelle aree senza eco radar, nelle quali è ottenuto o per estrapolazione dalle aree vicine, oppure dal *tracking* di pochi pixel isolati.

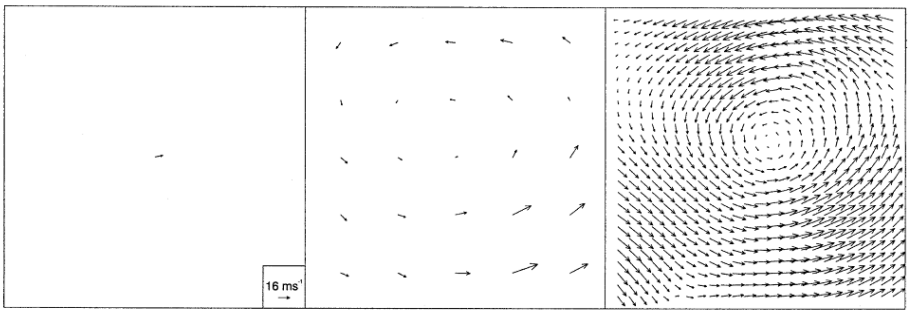


FIGURA 4.8: **Campi di moto da VET.** Nella figura soprastante, tratta da Germann e Zawadzki [41], viene mostrato un esempio di tre campi di moto successivi, a risoluzione crescente, prodotti dalla tecnica VET utilizzando una procedura di *scaling-guess*. Si inizia con una griglia 1x1, generando un campo di moto uniforme (immagine a sinistra), che viene così usato come primo tentativo per la generazione del successivo tentativo, condotto su una griglia 5x5, producendo a seguito della minimizzazione della funzione di costo un campo di moto più elaborato (immagine nel mezzo), il quale a sua volta viene utilizzato come primo tentativo per la generazione del campo di moto finale su una griglia 25x25 (immagine a destra).

Se quella schematizzata per punti costituisce la procedura generale dell'algoritmo VET, una sua modifica riesce a condurre a risultati molto più affidabili. Infatti, c'è la possibilità che l'*algoritmo del gradiente coniugato* conduca a minimi secondari, generando un campo di velocità fallace.

Per evitare questo si è provato che è sufficiente fornire un campo di $\mathbf{v}_{m,n}$ di primo tentativo sufficientemente vicino al campo reale. Per ottenere questo *first guess*, Laroche and Zawadzki [57] hanno sviluppato una procedura in cui la ricerca del campo di velocità è condotta attraverso più fasi di minimizzazione, aumentando progressivamente la risoluzione spaziale della griglia a partire da scale spaziali molto ampie. Detta *scaling-guess procedure*, questa modifica riduce enormemente il rischio che si possa convergere verso minimi secondari. In FIGURA 4.8 è illustrato un esempio dei campi di moto successivi derivanti da una procedura di questo tipo.

La tecnica VET appena descritta viene utilizzata per l'individuazione del campo di moto all'interno dell'importante sistema di nowcasting chiamato MAPLE. Acronimo che sta per *McGill Algorithm for Precipitation nowcasting using semi-Lagrangian Extrapolation*, questo sistema di nowcasting, sviluppato dal gruppo di ricerca sul radar meteorologico della McGill University canadese, pone le sue radici nel 1974 con uno studio di Bellon e Austin [7], ed è ancora oggi soggetto a modifiche e miglioramenti. É proprio il pluricitato articolo di Germann e Zawadzki [41] del 2002 a conservarne le principali caratteristiche, rendendosi il principale riferimento

bibliografico per il sistema MAPLE.

La tecnica VET appena descritta sarà utilizzata nel presente studio di tesi per il calcolo del campo di moto, affianco alla più semplice tecnica del *campo di moto uniforme*.

4.4 La tecnica del cell tracking

Questa tecnica, in contrapposizione alla tecnica di *area tracking*, non insegue una generica porzione di spazio derivante dalla suddivisione casuale dell'immagine in zone quadrate formanti una griglia regolare, bensì insegue una *cella temporalesca*, ovvero il nucleo di un evento precipitativo intenso, determinandone la posizione e successivamente seguendolo nella sua evoluzione. Il fine è quello di localizzare con precisione gli eventi temporaleschi, tipicamente a carattere *convettivo*, ed estrapolarne i movimenti futuri in modo piuttosto qualitativo, per fornire eventuali *warnings*.

Si tratta di un obiettivo diverso da quello degli algoritmi basati sull'*optical flow* o sull'*area tracking*, validi per qualsiasi evento piovoso, tanto a carattere *convettivo* quanto a carattere *stratiforme*, e pensati per ottenere risultati più precisi sul campo di moto.

Poiché il presente studio di tesi non verterà esclusivamente sugli eventi di tipo convettivo, la tecnica basata sul *cell tracking* non vedrà la luce. Tuttavia si citano alcuni importanti sistemi di *cell tracking* descritti in letteratura, come TITAN [28] (acronimo di *Thunderstorm Identification Tracking Analysis and Nowcasting*), l'algoritmo più utilizzato a livello mondiale nel campo della previsione di eventi convettivi, oppure SCIT [53] (acronimo di *Storm Cell Identification and Tracking*).

Capitolo 5

Il metodo degli analoghi

5.1 Introduzione al capitolo

Confezionare previsioni usando *analoghi* rappresenta uno dei più antichi metodi di previsione del tempo. Infatti, è da millenni che l'uomo riesce a farsi un'idea qualitativa del tempo che verrà riconoscendo nel cielo configurazioni atmosferiche già viste nel passato e, avendo in mente il tempo meteorologico che ad esse ha fatto seguito, eleggendo quest'ultimo a previsione. Si tratta di un metodo semplice e intuitivo, basato sull'individuazione di situazioni meteorologiche *analoghe* a quelle verificatesi nel passato, ma spesso efficace per ottenere una previsione macroscopica a brevissimo termine non priva di una certa affidabilità.

Il *metodo degli analoghi* di cui si parlerà all'interno di questo capitolo prende spunto proprio dall'idea insita in questa previsione meteorologica primordiale, sostituendo il bagaglio mnemonico di situazioni meteorologiche vissute dall'uomo con un database informatico di situazioni atmosferiche passate, e il riconoscimento qualitativo delle condizioni atmosferiche operato dalla mente umana con quello di precisione operato da un elaboratore elettronico.

All'interno della prima sezione si definirà brevemente la *pioggia orografica*, dante il nome alla sezione, per poi calarsi a capofitto nella metodologia di previsione per analoghi, fornendone i dettagli anche in relazione alle pubblicazioni scientifiche attorno a essa. Infine, nell'ultimo paragrafo della medesima sezione verrà presentato il sistema per analoghi NORA, dal quale si prenderà spesso spunto per lo sviluppo del sistema NACO.

Per la nascita di questo capitolo si è perlopiù attinto dallo studio del 2011 appena nominato, condotto da Panziera *et al.* e intitolato *NORA–*

Nowcasting of orographic rainfall by means of analogs [84].

5.2 La precipitazione orografica

Prima d'introdurre il *metodo degli analoghi* occorre introdurre la ragione principe che ha portato allo sviluppo di questo metodo nell'ambito delle previsioni a brevissimo termine: la cosiddetta *pioggia orografica* (in lingua inglese *orographic precipitation*).

5.2.1 Caratteristiche

Questo tipo di precipitazione piovosa ha origine nel momento in cui una massa d'aria, carica di un certo quantitativo di vapor d'acqua, si muove orizzontalmente (di moto *avvettivo*, in gergo tecnico) verso un rilievo montuoso. Trovando il passaggio impedito dall'ostacolo orografico, può aggirarlo, continuando nel suo moto orizzontale ma biforcandosi e convergendo *a valle* del rilievo (si parla di *lee-side convergence*), oppure scavalcarlo, salendo lungo il suo pendio (si parla di *orographic lifting*, si veda la FIGURA 5.1).

É in questo secondo caso che la massa d'aria, elevandosi a quote maggiori, subisce un'espansione adiabatica e, di conseguenza, un raffreddamento, portando alla condensazione del vapor d'acqua in goccioline: si è formata della pioggia dovuta esclusivamente all'orografia complessa, perciò detta *pioggia orografica*.

Se non si tratta di una semplice massa d'aria umida che si dirige verso un rilievo montuoso, bensì di una nube di pioggia, l'effetto più evidente dell'interazione tra il rilievo e il flusso atmosferico della nube consiste nel cosiddetto *enhancement* della precipitazione, ovvero nell'*intensificarsi* del fenomeno piovoso nel momento in cui inizia a scalare il *pendio sopravento* (l'*upwind slope*, anche detto *windward side*, in contrapposizione al *pendio sottovento*, detto *downwind slope*, o *leeward side*), e ciò è dovuto all'aggiungersi di una componente di *pioggia orografica* oltre alla precipitazione già presente, determinando l'ingigantirsi dei gradienti spaziali associati alle grandezze relative alla precipitazione.

Come fanno notare Foresti e Pozdnoukhov [35], tuttavia, le fenomenologie che producono *pioggia orografica* sono piuttosto varie e, oltre alla tipologia appena descritta, possono esserci fenomeni di precipitazione orografica anche su scale più ridotte, dando vita a veri e propri temporali sul fianco sopravento del rilievo oppure sulla sua sommità a seconda dei

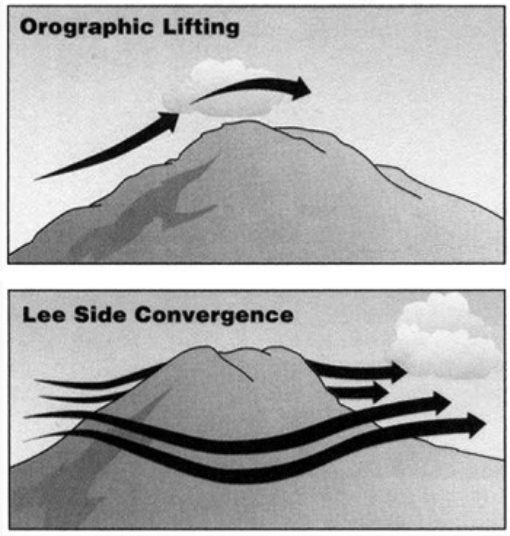


FIGURA 5.1: **Interazione del flusso con l'orografia.** Nelle due immagini, tratte da Whitman [114], vengono presentati i due più probabili percorsi che un flusso d'aria orizzontale può seguire nell'interfacciarsi a un rilievo montuoso. In un caso la massa d'aria può aggirare i fianchi della montagna, biforcandosi per poi convergere nuovamente una volta oltrepassato l'ostacolo (fenomeno chiamato *lee-side convergence*, e mostrato nella figura in basso). Nell'altro caso la massa d'aria può essere spinta ad ascendere il pendio sopravento della montagna, dando vita alla *pioggia orografica* (fenomeno chiamato *lifting orografico*, e mostrato nella figura in alto).

meccanismi coinvolti nella generazione della pioggia (si veda la FIGURA 5.2 per ulteriori dettagli).

Si sottolinea, per *sfiorare* la complessità che governa fenomeni di questo tipo, che i meccanismi che generano la *precipitazione orografica* dipendono tanto dalla *dinamica dei flussi d'aria*, quanto dalla *microfisica delle nuvole* (in lingua inglese, rispettivamente *airflow dynamics* e *cloud microphysics*), coinvolgendo così scale spaziali e temporali molto diverse. Da un lato, gli aspetti *dinamici* dipendono dalle caratteristiche del flusso d'aria che si dirige verso il rilievo orografico e dalla configurazione specifica del terreno, due fattori che determinano il modo in cui il flusso interagirà con l'orografia e la precipitazione che produrrà. Infatti, quest'ultima risente fortemente della pendenza locale, che determina la velocità d'ascesa del flusso e di conseguenza i gradienti di pressione e di temperatura che questo subisce, incidendo sulla quantità di condensazione che si avrà. Dall'altro lato, gli aspetti concernenti la *microfisica* della nuvola determinano quale percentuale d'acqua all'interno di essa verrà convertita in pioggia, e quanto

rapidamente questo processo avverrà (si veda lo studio del 2005 di Smith *et al.* [104]). La conversione del *condensato* in particelle piovose non rappresenta un aspetto di facile studio in quanto, come sottolineato da Rotunno *et al.* [99], questo processo dipende da almeno altre due fenomenologie oltre alla *microfisica delle nuvole*: dalla *convezione sulla piccola scala* e dai *moti caotici* dei flussi turbolenti.

Infine, si può pensare che la *pioggia orografica* aumenti linearmente scalando un monte, in quanto all'aumentare della quota la temperatura diminuisce di continuo, portando alla continua condensazione del vapor d'acqua e al presunto aumento dell'intensità di pioggia. Tuttavia uno studio del 1986 di Alpert [3] smonta questa tesi provando che esiste una quota specifica, funzione dell'altezza del monte, della pendenza del suo fianco e di altri parametri, a cui può rilevarsi la massima intensità di pioggia. Ciò è dovuto al fatto che, se da un lato l'aumento di quota porta alla continua condensazione, dall'altro rende anche più rarefatta l'aria, riducendo il quantitativo di vapor d'acqua in essa presente e, di conseguenza, limitando la conversione in pioggia.

5.2.2 La previsione della pioggia orografica

La problematica relativa a questo tipo di precipitazione è prettamente *previsionale*. Da un lato, come sottolineano Panziera e Germann [83], c'è un interesse crescente da parte dei servizi meteorologici e idrologici verso la previsione di intensità, localizzazione ed evoluzione delle piogge orografiche, richiedendo previsioni a brevissimo termine e ad aggiornamento frequente durante gli eventi piovosi intensi. Ciò è dovuto al fatto che questo tipo di pioggia è responsabile della maggior parte delle alluvioni che colpiscono le regioni montuose (nello specifico, questo studio si estenderà sulla regione Alpina), rendendosi oggetto di forti necessità previsionali.

Dall'altro lato, si tratta di un fenomeno fisicamente molto complesso e, di conseguenza, difficile da prevedere. Come puntualizzano Panziera *et al.* [84], negli ultimi trent'anni sono stati condotti diversi studi sperimentali incentrati sulla precipitazione che ha luogo su terreni orograficamente complessi, come lo studio TAMEX condotto in Taiwan [56], oppure lo studio MAP [99], ma si è sempre trattato di lavori finalizzati alla comprensione dei meccanismi che regolano la pioggia orografica, senza dare particolare risalto ai problemi nel predirla. Per questo motivo c'è forte carenza, tra i sistemi di *nowcasting*, di procedure operative specificatamente pensate per la previsione di piogge orografiche.

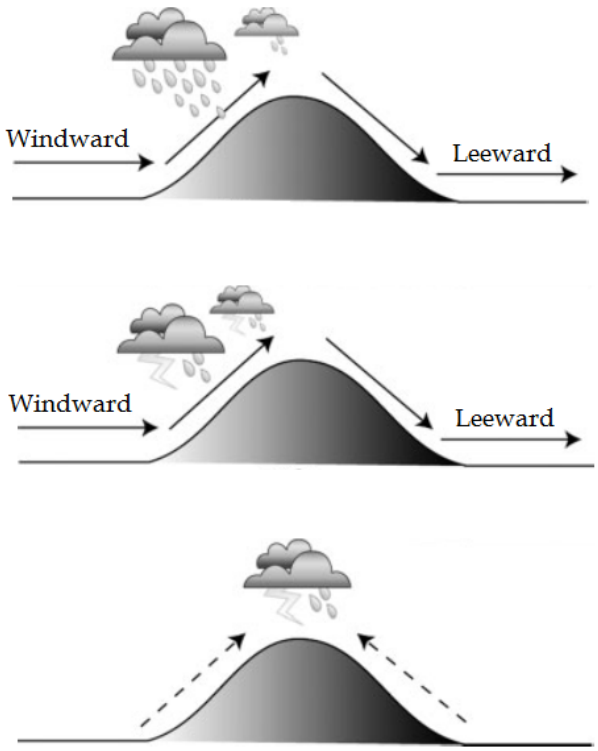


FIGURA 5.2: **Meccanismi portanti a pioggia orografica.** Nelle tre immagini, tratte da Foresti e Pozdnoukhov [35], vengono schematicamente illustrati tre meccanismi che possono dare esito a *precipitazione orografica*. Nella figura in alto è presentata la situazione più tipica, quella in cui un rilievo montuoso forza il flusso d'aria a salire (*forcing orografico*) provocando espansione adiabatica e condensazione, con conseguente aumento dell'intensità di pioggia sul fianco sopravento del rilievo montuoso e decadimento sul fianco sottovento. Nelle figure sottostanti, due situazioni meno frequenti ma maggiormente intense: per rilievi più piccoli, quindi su scale spaziali più ridotte, può accadere che l'intensificazione della pioggia appena descritta porti addirittura a un temporale sul fianco sopravento (figura centrale), oppure che si inneschino fenomeni di ascesa del flusso indotti *termicamente* oltre che *meccanicamente*, e nascano temporali in cima al rilievo orografico a seguito dell'ascesa del flusso non solo lungo uno dei due fianchi, ma lungo entrambi (figura in basso).

I *modelli numerici*, dal canto loro, rappresentano il metodo previsionale migliore per ottenere informazioni future sulla pioggia orografica, ma solo a lungo termine e ad ampio range, perdendo di dettaglio tanto sulla scala temporale quanto su quella spaziale – dettaglio tuttavia necessario per fornire tempestivi allarmi idrologici e mitigare i danni da alluvione. Inoltre, i modelli numerici trovano difficoltà nel predire l'esatto inizio, l'esatta intensità e l'esatta localizzazione di questo tipo di precipitazione, risultando più inaccurati che con altre tipologie di pioggia. In più, i cicli di assimilazione delle condizioni iniziali e di inizializzazione del modello richiedono molto tempo, ritardandone l'output fino a rendere troppo lungo il tempo per generarlo rispetto alle necessità degli utenti finali della previsione. Come esempio, si riportano i dati relativi al modello numerico COSMO2[1]: per quanto riguarda le tempistiche, per la generazione dell'output e, successivamente, per la sua interpretazione e diffusione si impiegano circa 2 ore, mentre per quanto riguarda il livello di dettaglio spaziale, la risoluzione di 2.2 km non permette di prevedere fenomeni che avvengono entro gli 8 km, e ciò rende il modello inadeguato rispetto ai requisiti di *nowcasting*.

In più, oltre alle difficoltà già presenti, Roe [96] fa notare che il modo in cui il flusso atmosferico interagisce con l'orografia può variare molto non solo al variare del fenomeno precipitativo considerato, ma anche all'interno del medesimo al modificarsi delle condizioni ambientali, rendendo così la *pioggia orografica* un fenomeno fortemente sfuggente ed estemporaneo. Per questa estrema mutevolezza tanto sulla scala spaziale quanto su quella temporale, diversi modelli fisici di *pioggia orografica* sviluppati nel passato non sono adatti per la previsione di fenomenologie piovose su orografia complessa, specialmente se si punta a previsioni su ridotta scala temporale.

Per questo motivo, se viene richiesta una previsione a brevissimo termine per le piogge orografiche, occorre perlomeno affiancare ai modelli numerici altri metodi di previsione, basate per esempio su *metodi di estrapolazione*. L'inclusione dei meccanismi che producono pioggia orografica all'interno di *metodi estrapolativi* basati su immagini radar in tempo reale è oggetto di diverse ricerche, ma sono due gli ordini di motivi che rendono enormemente difficoltoso questo proposito [71]: in primis la complessità che governa i fenomeni di pioggia su orografia complessa, e in secundis la difficoltà nel reperire osservazioni dettagliate e precise in corrispondenza delle regioni montuose.

[1] Si tratta di un modello meteorologico numerico il cui nome rappresenta l'acronimo di *COnsortium for Small-scale MOdeling*. Per ulteriori informazioni, si consulti il sito web `http://cosmo-model.org/`.

Per quanto riguarda la prima motivazione, come sottolineano Foresti *et al.* [32] i processi di pioggia orografica interagiscono dinamicamente a diverse scale spaziali e temporali, complicando la fenomenologia risultante, che presenta caratteristiche peculiari: maggiore *stazionarietà* dei pattern di pioggia sulla larga scala, evoluzione più rapida delle caratteristiche sulla piccola scala, occorrenza di meccanismi di *Growth & Decay* indotti dalle caratteristiche orografiche locali, permanenza maggiore di eventuali temporali. Queste variazioni riducono fortemente la predicibilità associata alla *persistenza Lagrangiana*, a meno che non si compiano su di essa delle modifiche simili a quelle operate con l'introduzione del termine di *source-sink* (si veda sezione sulla *persistenza Lagrangiana modificata* all'interno del capitolo *I metodi di estrapolazione*).

Quanto alla seconda motivazione, la forte variabilità spazio-temporale del fenomeno richiede osservazioni ad alta risoluzione spaziale e temporale. Le reti di *pluviometri* non sono sufficientemente fitte per riprodurre in maniera accettabile questa alta variabilità spaziale e, come fanno notare Smith *et al.* [105], perfino le reti di pluviometri disposte sulle Alpi europee – tra le reti più fitte al mondo – non riescono a raggiungere, con la loro risoluzione media di 10 km, una sufficiente densità spaziale. Dal canto loro, le osservazioni da *radar meteorologico* possiedono la sufficiente risoluzione spaziale e temporale, ma non hanno prestazioni eccellenti quando effettuano misurazioni su orografia complessa. Infatti, l'accuratezza delle stime radar su regioni montuose è minata dal fenomeno del *ground clutter* e da quello del *beam shielding*, rendendosi necessarie opportune correzioni perché possano ottenersi risultati con una buona accuratezza.

É per queste difficoltà nel predire i fenomeni di *pioggia orografica* tanto usando *modelli numerici* quanto facendo uso di *metodi di estrapolazione* che, negli ultimi decenni, si è sviluppato il *metodo degli analoghi*.

5.3 Un metodo basato sull'analogia

Prevedere per mezzo di *analoghi* rappresenta, come detto nella sezione introduttiva al capitolo, uno dei metodi di previsione meteorologica più datati di sempre. In questa sezione si dettaglieranno caratteristiche, limitazioni ed evoluzione della metodologia attraverso le più importanti pubblicazioni scientifiche inerenti al tema degli analoghi.

5.3.1 Caratteristiche e limitazioni

Secondo la definizione fornita da Edward Norton Lorenz, padre della *teoria del caos*, nell'articolo del 1969 intitolato *Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues* [63], il termine *analoghi* identifica due stati dell'atmosfera che, all'osservazione, paiono somigliare l'uno all'altro. Il metodo fondato sugli analoghi, allora, confeziona previsioni sulla base di un'assunzione fondamentale: condizioni atmosferiche simili (quelle di due *analoghi*) evolveranno in modi simili.

Sulla base di ciò, l'applicazione di questa metodologia risulta estremamente semplice: una volta individuato un *analogo* alla situazione meteorologica corrente, la previsione valida per un certo periodo di tempo successivo può essere ottenuta dall'evoluzione delle condizioni meteorologiche osservate dopo il verificarsi della situazione *analoga* del passato. La difficoltà, tuttavia, risiede proprio nell'individuazione di un *buon analogo*, compito non banale, del quale si parlerà a breve.

Se l'uso ancestrale di questo metodo per previsioni qualitative basate sull'osservazione del cielo richiedeva un certo bagaglio mnemonico di situazioni atmosferiche di cui si era fatta esperienza, davanti a una metodologia scientifica basata sugli analoghi occorre un corrispondente strumento informatico che faccia le veci della memoria umana: un *database*. É questo strumento che, raccogliendo i dati relativi a eventi precipitativi del passato, fungerà da bagaglio esperienziale e consentirà, dopo un'opportuna analisi di analogia, di estrarre le situazioni del passato maggiormente simili alla situazione meteorologica corrente.

Tuttavia, proprio la dimensione del database di eventi passati costituisce il limite più grande dell'approccio per analoghi. Infatti, tanto più profondo è il database, tante più situazioni meteorologiche esso racchiude, portando statisticamente all'ottenimento di *analoghi migliori*, ovvero a situazioni maggiormente analoghe.

La profondità del database necessaria all'ottenimento di analoghi sufficientemente vicini alla situazione corrente dipende, tuttavia, dalla scala spaziale dell'evento. Infatti, come argomenta Toth [106] in un suo studio sulle previsione ad ampio range spaziale, è necessario un archivio estremamente ampio se si vogliono condurre previsioni per analoghi a scala globale, mentre è sufficiente un archivio modesto se la previsione è condotta su una piccola area. Inoltre, uno studio di van Den Dool del 1993 [109] fu condotto specificatamente sulla profondità dell'archivio storico in relazione all'ampiezza del dominio spaziale e all'errore che si ammette nell'analogia. Un risultato di questo studio sancisce che, nel caso in cui l'area spaziale

copra un intero emisfero terrestre e ammettendo un errore di analogia pari all'errore commesso dagli strumenti di osservazione, sarebbe necessario un archivio storico ampio 10^{30} anni per soddisfare le condizioni! Ovviamente, limitandosi a un'area spaziale più ristretta e a un errore di analogia meno vincolante, si possono utilizzare anche archivi contenenti solamente un decennio di eventi meteorologici.

Se da un lato la limitata estensione dell'archivio storico a disposizione può minare fortemente la predicibilità associata al metodo, d'altro canto un evidente pregio è quello di riuscire a fornire previsioni meteorologiche assolutamente realistiche senza la necessità d'introdurre alcuna semplificazione nella fisica dell'atmosfera. Infatti, le fenomenologie aggiuntive dovute all'interazione del flusso d'aria con l'orografia sono automaticamente incluse all'interno delle osservazioni passate, per cui non c'è bisogno d'innestarle in un modello fisico parametrizzandole o aggiungendo termini che ne modellizzino l'evoluzione. Utilizzando *osservazioni* come *previsione*, tutte le possibili tipologie di fenomenologie, orografiche e non, sono già incluse.

5.3.2 L'evoluzione del metodo

Non si è ancora definito quale tipo d'osservazione meteorologica possa essere utilizzata per un metodo di previsione tramite analoghi. A questa questione non c'è una risposta univoca, in quanto il *metodo degli analoghi* è stato storicamente utilizzato nel campo meteorologico a partire da dati osservativi di diversa natura, spesso a seconda della differente finalità.

Ad esempio, nel 1994 Mohri *et al.* [72] sviluppavano uno dei primissimi sistemi di previsione meteorologica basati sugli analoghi: WINDOM. Con un acronimo che, senza troppa pedanteria, sta per *Weather forecast system usINg observation Data On Memory*, questo sistema prevedeva le condizioni meteo delle successive 6 ore sulla base del confronto della situazione meteorologica corrente con quelle del passato contenute in un ampio archivio storico, pervenendo tramite algoritmi di *memory-based reasoning* alle situazioni maggiormente analoghe. Rispetto alle (ai tempi) centralissime previsioni basate sui modelli numerici, che richiedevano l'*interpretazione* dell'output da parte dei meteorologi, la previsione di WINDOM slegava la qualità della previsione dalle competenze e dall'esperienza del singolo meteorologo, e forniva un pronostico basato su tecniche automatiche di riconoscimento delle somiglianze avendo a disposizione una grossa quantità di *esperienza* racchiusa all'interno di un database informatico, molto più capiente rispetto a un cervello umano. In più, le problematiche associate alle NWP, dovute principalmente ai lunghi tempi per ottenere una previ-

sione, alla necessità di far girare periodicamente il modello numerico e alla definizione delle condizioni al contorno, venivano incredibilmente assorbite dalla semplicità della metodologia per analoghi, mantenendo tuttavia piuttosto estesi i tempi di calcolo. Quanto alle osservazioni utilizzate da Mohri, si trattava di misure di variabili termodinamiche come temperatura e velocità del vento, e la ricerca degli analoghi era condotta sulle distribuzioni spaziali di queste.

Leggermente diversa la tipologia di osservazioni usata all'interno dello studio sull'utilizzo degli analoghi condotto nel 2002 da Obled *et al.* [77]. Questo studio, infatti, utilizzava principalmente le osservazioni relative alla pressione atmosferica (ovvero alle *quote geopotenziali*, nello specifico quella a 700 hPa e a 1000 hPa) e sulla loro base ricercava analoghi in un *archivio meteorologico* coprente 43 anni di osservazioni, puntando a una previsione a medio termine (tra i 2 e i 3 giorni). In modo simile a quanto veniva fatto per la comprensione degli *output* dei modelli numerici (la cosiddetta *Model Output Statistic*, volta a correlare gli output nel tempo e ad associare certe condizioni meteorologiche a certi output attraverso studi statistici), il metodo di Obled ricercava situazioni analoghe in termini di quote geopotenziali e, utilizzando parallelamente all'*archivio meteorologico* un *archivio idrologico* coprente il medesimo range temporale, pronosticava l'eventuale pioggia.

Uno studio sull'utilizzo degli analoghi per la pura comprensione di un *output* numerico è stato condotto da Root *et al.* [97] con il fine di riconoscere, prima ancora di prevedere, eventi meteorologici intensi. Alla base dello studio c'era la convinzione che i grossi eventi meteorologici fossero portatori di specifiche *anomalie* che, individuate, potessero costituire un'*impronta* caratterizzante gli eventi intensi, rendendoli individuabili sin dagli *output* dei modelli numerici. Queste anomalie, spesso sfuggenti per un meteorologo, venivano invece identificate senza problemi dagli algoritmi di analogia.

Con lo studio del 2008 di Diomede *et al.* [27] si continua a cercare analoghi confrontando variabili meteorologiche come *altezza geopotenziale*, *velocità verticale* del vento e *umidità specifica*, aggiungendo però carattere *probabilistico* alla previsione per analoghi.

5.3.3 L'esempio del sistema NORA

Solo con il sistema di previsioni a brevissimo termine NORA [84] si perviene all'utilizzo prepotente di osservazioni da *radar meteorologico* per la ricerca degli analoghi. Stante per *Nowcasting of Orographic Rainfall by*

means of Analogues, questo sistema di previsioni a brevissimo termine si fonda, come dice il nome, sul metodo degli analoghi con il fine di prevedere specificatamente la precipitazione che colpisce le zone a orografia complessa: la *pioggia orografica*.

Infatti la metodologia per analoghi, poiché si fonda su (vecchie) osservazioni e non su modelli, porta con sé il contributo di tutti i fenomeni che avvengono nella realtà, nessuno escluso. Quelle complesse fenomenologie di matrice orografica che, come si è visto nella sezione precedente, si aggiungevano alla già complessa fisica del flusso atmosferico e delle nuvole, e che dovevano essere introdotte con opportuni termini all'interno delle equazioni, il metodo degli analoghi permette di includerle in automatico. É per questo motivo che questo nuovo metodo risulta il più adatto per la previsione della *pioggia orografica* e, viceversa, la *pioggia orografica* risulta altresì l'applicazione migliore per il *metodo degli analoghi*.

Quest'ultima affermazione è dovuta al fatto che il *forcing orografico* che provoca il *lifting* delle masse d'aria in corrispondenza dei pendii montuosi conferisce *ripetibilità* al campo di precipitazione osservato. Infatti, come provato da Panziera e Germann [83] in uno studio sulla relazione tra le caratteristiche del flusso d'aria e il pattern di pioggia orografica prodotto sull'arco alpino tra Svizzera e Italia, i rilievi montuosi, non spostandosi nel tempo, esercitano l'azione di *forcing orografico* sempre negli stessi punti, portando all'intensificazione della precipitazione sempre negli stessi punti e, di conseguenza, producendo pattern piovosi *più simili*, al cambiare dell'evento considerato, rispetto a quelli che possono ottenersi in corrispondenza di una topografia pianeggiante. Questa caratteristica, perciò, rende potenzialmente più efficace il metodo degli analoghi per la previsione su aree a orografia complessa.

Nello specifico, Panziera e Germann [83] hanno trovato una forte relazione tra pattern di precipitazione e specifiche caratteristiche del flusso quali l'*intensità e direzione del vento* e la *stabilità della massa d'aria* in movimento verso il rilievo montuoso. Questo forte legame suggerisce che la somiglianza di queste tre variabili fisiche, chiamate *predictors* dagli autori, possa portare a pattern piovosi simili, costituendo un buon criterio d'analogia. Ma gli sviluppatori del NORA, non soddisfatti di un unico criterio d'analogia, hanno introdotto come secondo criterio la somiglianza degli echi radar associati agli eventi piovosi. Perciò la ricerca degli analoghi nel sistema NORA è condotta tanto sulla base di *predictors* fisici quanto sulla base della somiglianza tra le immagini contenenti i campi di riflettività radar.

L'algoritmo su cui si fonda NORA riesce a produrre in pochissimo tempo – circa 2 minuti – previsioni valide per diverse ore, aggiornandole ogni 5 minuti. Inoltre, si avvale di osservazioni radar ad alta risoluzione, tanto spaziale quanto temporale, ottenendo sia dati di *riflettività* che dati di *velocità Doppler*, due quantità che vanno a costituire, assieme alla *stabilità* dell'aria, i *predictors*.

Si sottolinea che le previsioni, essendo basate su osservazioni del passato, non solo sono già comprensive delle fenomenologie orografiche, ma anche dei processi di *Growth & Decay* che, usando un classico metodo di estrapolazione tramite *persistenza Lagrangiana*, si sarebbero dovuti modellizzare tramite l'aggiunta di un *termine di source-sink* apposito (si veda la sezione *La persistenza Lagrangiana modificata* all'interno del capitolo *I metodi di estrapolazione*).

Per quanto concerne l'archivio storico dentro il quale ricercare gli analoghi, è importante che questo sia sufficientemente ampio da coprire l'intero range di fenomeni d'interesse e che, in più, contenga solamente eventi precipitativi in cui il *forcing orografico* giochi un ruolo importante, in quanto è con la finalità di prevedere pioggia prevalentemente orografica che il NORA è stato sviluppato. Con quest'ultimo obiettivo, dettato anche dalla necessità di ridurre al minimo il costo computazionale riducendo il più possibile la quantità di immagini radar tra cui svolgere la ricerca, la scelta degli eventi da inserire nell'archivio è ricaduta su quelli a lunga durata e ad ampia portata spaziale, escludendo quelli convettivi o di breve durata. Seguendo principalmente questi due criteri, gli autori del NORA hanno messo su un archivio storico costituito da 71 eventi piovosi, per un totale di 127 giorni di pioggia.

In questo studio di tesi si prenderà spunto principalmente dal sistema NORA appena descritto, apportando tuttavia alcune modifiche, in alcuni casi per mancata disponibilità di dati di un certo tipo, in altri casi per motivi computazionali oppure, semplicemente, per sperimentare qualche novità metodologica.

Per distinguere il metodo per analoghi che si metterà a punto nelle pagine seguenti – e con il quale si condurranno le analisi – dai metodi per analoghi appena presentati, si indicherà la metodologia per mezzo dell'acronimo NACO, stante per *Nowcasting by Analogues over Complex Orography*.

Capitolo 6

NACO – I dati radar

6.1 Introduzione al capitolo

Come anticipato a conclusione del capitolo precedente, l'acronimo NACO presente nel titolo del presente capitolo fa riferimento alla metodologia per analoghi sviluppata all'interno del presente studio di tesi, e descritta nel capitolo successivo. Stante per *Nowcasting by Analogues over Complex Orography*, quest'acronimo nasce per la pura necessità pratica di far riferimento, in modo rapido, alla procedura sviluppata all'interno di questo lavoro finalizzata all'ottenimento di previsioni a brevissimo termine per mezzo di analoghi, valutandone successivamente la predicibilità.

All'interno di questo capitolo, dopo una breve trattazione sul *radar meteorologico* e sulle sue principali caratteristiche, nella sezione *I radar gestiti da ARPA Piemonte* si descriveranno i radar meteorologici i cui dati sono stati impiegati all'interno di questo studio, per poi elencare nella sezione *Gli eventi a disposizione* i fenomeni precipitativi da essi descritti, fornendo una classificazione di essi sulla base delle caratteristiche dei campi di riflettività associati. Gli eventi raccolti costituiranno l'archivio radar in dotazione al sistema NACO. Infine, nella sezione *La scelta della regione* si definiranno le possibili aree geografiche su cui condurre le previsioni per analoghi, oggetto dei successivi capitoli.

Per lo sviluppo di alcune parti di questo capitolo si è fatto riferimento principalmente al lavoro di tesi del 2006 di Barbara Picco, intitolato *Analisi della correlazione tra misure pluviometriche e radar-meteorologiche per differenti tipologie di evento* [87], e allo studio di dottorato di Alfieri intitolato *Statistical and physical properties of precipitation and implications for flood risk assessment* [1].

6.2 Il radar meteorologico

Il *radar meteorologico* rappresenta senza dubbio il principale strumento osservativo per la stima in tempo reale della precipitazione, ma svolge un ruolo estremamente importante anche nell'ambito della *previsione a brevissimo termine*, già chiamata *nowcasting*. Poiché nell'ambito del NACO costituirà il solo e unico strumento d'osservazione meteorologica, sembra quantomeno doveroso dedicargli un'intera sezione.

6.2.1 Evoluzione del radar meteorologico

Il *radar meteorologico* è semplicemente uno strumento portante con sé la tecnologia di un generico *radar*, ma asservito all'ambito meteorologico. Acronimo di *RAdio Detecting And Ranging*, il radar è uno strumento di misura da remoto che permette di esplorare, da un unico punto d'osservazione, un'ampia porzione di atmosfera, raccogliendo dati di diversa tipologia. La caratteristica di riuscire a compiere misure pur non essendo in stretto contatto con l'oggetto delle sue analisi lo rende classificabile tra gli strumenti di *remote sensing*, della cui categoria fanno parte, ad esempio, anche i satelliti artificiali.

Nato con scopi militari durante la Seconda Guerra Mondiale, il primissimo impiego in ambito meteorologico si ebbe attorno agli anni '50, quando venne utilizzato per l'avvistamento di cicloni. Tuttavia in quegli anni si trattava ancora dei cosiddetti *radar di prima generazione*, dalle prestazioni molto limitate e dalle misurazioni prettamente qualitative.

Perché diventassero *quantitative* si dovettero aspettare i *radar di seconda generazione*, con i quali si riuscì a stimare la *quantità di precipitazione*, oltre che a ottenere una stima della velocità delle idrometeore, la cosiddetta *velocità Doppler*. É per questo motivo che questi radar vengono anche detti *radar Doppler*.

Per la stima della quantità di pioggia si pensò di associare la *riflettività radar* Z, misura diretta fornita dallo strumento e associata a ciascuna cella radar elementare, all'*intensità di pioggia* R, dopo aver notato uno stretto legame tra le due quantità.

Tuttavia, più di recente, il proliferare di una grande quantità di relazioni differenti per legare le due grandezze ha portato alla nascita di radar ancora più sofisticati, capaci di misurare non solo la velocità Doppler ma anche parametri legati alla polarizzazione: sono i *radar di terza generazione*. Chiamati anche *radar polarimetrici*, tramite la trasmissione alternata d'impulsi polarizzati orizzontalmente e verticalmente consentono di ricava-

Banda	**Frequenza (f)**	**Lunghezza d'onda (λ)**
L	$1-2$ GHz	$15-30$ cm
S	$2-4$ GHz	$8-15$ cm
C	$4-8$ GHz	$4-8$ cm
X	$8-12$ GHz	$2.5-4$ cm
K_u, K, K_a	$12-40$ GHz	$0.75-2.5$ cm

TABELLA 6.1: **Bande associate al campo delle microonde.** Nella tabella soprastante sono indicate le cinque bande principali di cui si compone la radiazione delle microonde, definendo per ciascuna di esse la *frequenza* f, misurata in [GHz], e la *lunghezza d'onda* λ, misurata in [cm]. É nella banca C che tipicamente funzionano i radar meteorologici, anche se non mancano tipologie operanti nella banda S.

re informazioni più dettagliate sulle idrometeore colpite, definendone anche la tipologia.

6.2.2 Il principio di funzionamento

Poiché il *radar meteorologico* non effettua una misura diretta delle variabili meteorologiche, non si può parlare di *misura* di esse, bensì di *stima*. Infatti, per ottenere le informazioni di maggiore utilità in ambito idrologico e meteorologico si rende necessaria la trasformazione, mediante formule il più delle volte empiriche, dei parametri direttamente misurati dal radar.

Il funzionamento del radar meteorologico prevede, per cominciare, la generazione di *onde elettromagnetiche impulsate*, nello specifico si utilizzano *microonde*. Queste, una volta generate dal *trasmettitore*, vengono focalizzate da un'*antenna direzionale* e trasmesse nell'atmosfera in una specifica direzione, producendo il cosiddetto *fascio radar*.

La *lunghezza d'onda* della radiazione nel campo delle microonde copre un intervallo che va dal centimetro ai 30 centimetri, definendo tipicamente cinque bande (si veda la TABELLA 6.1). In radiometeorologia, la *lunghezza d'onda* adottata è tipicamente scelta nella *Banda C*, la banda intermedia tra le cinque, con associata una $\lambda = 4-8$ cm, una decina di volte il diametro di una tipica idrometeora. Questo rapporto tra dimensione caratteristica delle idrometeore e lunghezza d'onda permette che avvenga il fenomeno fisico dello *scattering di Rayleigh*[1], e che la singola onda elettromagnetica

[1]Lo *scattering di Rayleigh*, anche detto *diffusione di Rayleigh*, è la diffusione elastica di un'onda elettromagnetica provocata da particelle piccole rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda stessa, ma non troppo. Questo fenomeno avviene, ad esempio, quan-

rilevi la precipitazione, di qualunque tipologia essa sia (pioggia, grandine, neve).

Infatti quest'ultima è *opaca* alla radiazione delle microonde della Banda C, e *diffonde* nell'ambiente circostante le onde da cui viene colpita. Parte di questa energia, che va sotto il nome di *radiazione retrodiffusa* (in lingua inglese *backscattering*), torna all'antenna e viene veicolata nel *ricevitore*, che l'analizza, pervenendo a informazioni riguardanti le idrometeore investire dalla radiazione: distanza dal radar, dimensioni, velocità di spostamento rispetto al radar (la cosiddetta *velocità Doppler*, basata sull'*effetto Doppler*[2] e dante il nome al *radar Doppler*), forma e orientazione, e tipologia dell'idrometeora (pioggia, neve oppure grandine). L'insieme delle informazioni che tornano al radar va sotto il nome di *eco radar*.

Se da un lato l'informazione sulla *velocità Doppler* delle idrometeore viene fornita dai radar *di seconda o terza generazione*, appositamente attrezzati per rilevare lo slittamento in frequenza della radiazione retrodiffusa e, conseguentemente, stimare la velocità dell'oggetto colpito, d'altro canto l'informazione sulla *forma, orientazione e tipologia* dell'idrometeora si fonda sulla doppia polarizzazione, orizzontale e verticale, che il radar *di terza generazione* – anche detto *radar polarimetrico* – riesce a conferire al fascio di microonde.

Operativamente, il radar meteorologico effettua delle *scansioni* dell'atmosfera con il suo fascio (tipicamente ampio circa 1°), compiendo rotazioni in azimut fino a coprire l'intero angolo giro e ripetendo il processo per differenti elevazioni. In questo modo si riesce a ottenere una *scansione volumetrica* del cielo. Un parametro per definire il tipo di scansione è il numero di impulsi trasmessi nell'unità di tempo, chiamato *pulse repetition ferquency* e spesso indicato brevemente con l'acronimo PRF.

do la luce attraversa un mezzo torbido (soprattutto gas e liquidi, ma anche solidi con impurezze). Lo *scattering di Rayleigh* della luce del Sole nell'atmosfera rappresenta il fenomeno fisico che spiega il colore azzurro del cielo: la molecola d'azoto – elemento che costituisce circa il 70% dell'aria – diffonde molto di più la luce vicina al viola che non quella vicina al rosso, regalandoci il tipico colore celeste. Al tramonto, invece, lo strato più spesso d'atmosfera percorso dalla radiazione solare altera il gioco della diffusione, portando a colori più vicini al rosso.

[2] L'*effetto Doppler* è un fenomeno fisico che consiste nella variazione *apparente* – rispetto al valore originario – della frequenza (o della lunghezza d'onda) associata a un'onda elettromagnetica quando la sua sorgente è in movimento rispetto all'osservatore che la percepisce. Quest'effetto determina una variazione più profonda del suono prodotto da una sirena in avvicinamento o in allontanamento.

6.2.3 La potenza retrodiffusa

La *radiazione retrodiffusa* viene quantificata come potenza media di ritorno proveniente da un bersaglio a distanza r dal radar, indicata con P_r. Questa potenza è esprimibile tramite l'equazione che segue [1]:

$$P_r = \frac{CE^2}{r^2} Z \ . \tag{6.1}$$

Quest'equazione, spesso detta *equazione del radar meteorologico*, dipende da diverse grandezze:

- C, che rappresenta una costante che tiene conto di una serie di parametri relativi all'antenna e alle sue caratteristiche (potenza di trasmissione, guadagno, spessore del fascio, durata dell'impulso e lunghezza d'onda);
- E, che rappresenta il fattore dielettrico relativo al mezzo misurato ($E = 0.93$ per l'acqua liquida);
- Z, che rappresenta il *fattore di riflettività*, comunemente detto semplicemente *riflettività* e misurato in [$\mathrm{mm}^6/\mathrm{m}^3$].

Si nota che la potenza retrodiffusa che raggiunge l'antenna dipende dalla distanza r del radar dal bersaglio colpito secondo l'inverso del quadrato.

6.2.4 La riflettività

L'ultima grandezza citata nell'elenco delle variabili da cui dipende la potenza retrodiffusa è la più interessante, in quanto è quella che mostra un forte legame con la quantità d'acqua presente nella nube temporalesca e, quindi, con l'*intensità di pioggia* R. Infatti, la riflettività si definisce come

$$Z = \int_0^\infty N(D)\, D^6\, dD \ ,$$

con D il diametro della goccia di pioggia e $N(D)$ la distribuzione dei diametri all'interno della nuvola temporalesca.

Si nota che, essendo Z proporzionale alla potenza di ritorno P_r, tanto più Z è grande, tanta più potenza retrodiffusa viene misurata. In più, poiché dalla relazione appena scritta emerge che Z aumenta all'aumentare del numero di gocce e della loro dimensione $N(D)$, e realizzando intuitivamente che gocce più grosse o più numerose aumentano la cosiddetta *intensità di pioggia* (ovvero il quantitativo di pioggia caduta in un'unità

di tempo), allora questo suggerisce che la *riflettività radar* Z rappresenti una quantità in un certo modo proporzionale all'*intensità di pioggia* R, grandezza tipicamente misurata in [mm/h], che perciò può essere stimata indirettamente.

Questa intuizione ha portato alla compulsiva ricerca, da parte della comunità scientifica, di una qualche relazione che riuscisse a legare con sufficiente affidabilità le due grandezze R e Z.

6.2.5 La relazione Z-R

Nel mare magnum delle relazioni $Z - R$, c'è una cosa su cui tutti concordano, che deriva dall'utilizzo di una distribuzione standard per i diametri, ed è la tipologia di relazione: deve trattarsi di una *legge di potenza*, del tipo

$$Z = aR^b \ ,$$

con a e b rappresentanti i due coefficienti empirici oggetto di continue ricerche. É proprio il carattere empirico della relazione a rendere il radar meteorologico non un *misuratore* di precipitazione, bensì uno *stimatore*, e a sancire l'*indeterminazione* della relazione $Z - R$.

Tipicamente, a oscilla tra 70 e 500, mentre b varia tra 1 e 2. Questa coppia di coefficienti solitamente viene determinata basandosi sulla misurazione della distribuzione dei diametri delle gocce che giungono al suolo, oppure sul confronto tra i dati da pluviometro e quelli da radar.

Tuttavia questa distribuzione varia molto, non solo passando da un evento precipitativo a un altro, ma anche all'interno del medesimo evento, e ciò si deve all'evoluzione del fenomeno piovoso. Perciò determinare univocamente (a, b) non è possibile, e l'unico tentativo di generalizzazione possibile consiste nell'associare una certa coppia (a, b) a una certa tipologia di evento, come *stratiforme*, *convettivo* oppure *orografico*, oppure a una certa specifica regione o stagione. Un famoso grafico tratto da Battan [9], presentato in FIGURA 6.1, mostra le curve associate a una selva di sessantanove differenti relazione $Z - R$.

Due relazioni $Z - R$ che hanno avuto particolare fortuna in letteratura scientifica sono la relazione di Marshall e Palmer [69], sviluppata dai due scienziati nel lontano 1948 e presentata all'interno della pubblicazione intitolata *The distribution of raindrops with size* nella forma

$$Z = 200\, R^{1.6} \ ,$$

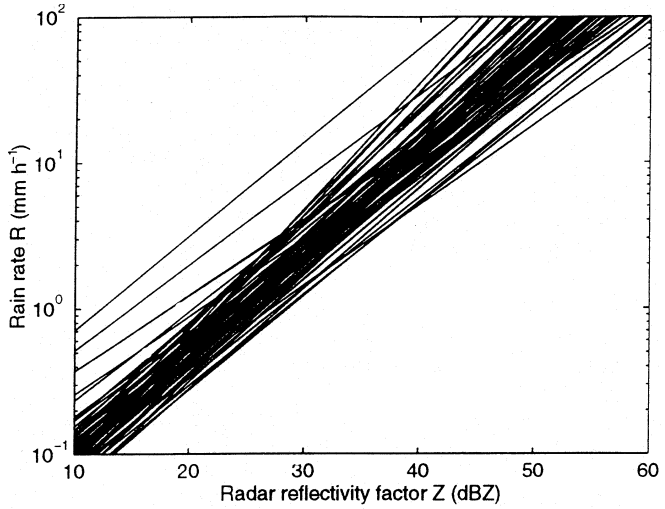


FIGURA 6.1: **Selva di relazioni Z-R.** In figura [9] vengono graficate le curve prodotte dalla relazione $Z - R$ utilizzando sessantanove possibili coppie di coefficienti (a, b). Lasciando che l'asse delle ascisse, ospitante la riflettività Z, sia di tipo logaritmico, le curve risultanti vengono a essere delle rette.

e la relazione di Joss e Waldvogel [54], ottenuta da uno studio molto più recente intitolato *A method to improve the accuracy of radarmeasured amounts of precipitation*, e assumente la forma

$$Z = 300\, R^{1.5} \ .$$

Alcuni studi hanno dimostrato che, almeno al di sopra della regione piemontese, la relazione di Joss e Waldvogel calza maggiormente rispetto a quella di Marshall e Palmer, rendendola per lungo tempo la relazione di conversione ufficiale presso ARPA Piemonte.

Di recente, però, uno studio di Claps *et al.* condotto nell'ambito del progetto FLORA [23] è arrivato a definire una nuova relazione $Z - R$, ottimizzata per il solo territorio piemontese e ottenuta confrontando dati radar e dati pluviometrici. Già due anni prima Alfieri *et al.* [2] avevano perseguito la ricalibrazione della relazione $Z - R$, ma sulla base di pochi dati, estesi a una piccola zona della regione Piemonte. La ricalibrazione di Claps *et al.*, invece, ha coinvolto dati attinti dall'intero territorio regionale per un gran numero di eventi precipitativi, dando luogo alla relazione $Z-R$ che segue:

$$Z = 40\, R^{2,5} \ .$$

Per quanto questa relazione rappresenti probabilmente la migliore relazione

$Z - R$ per il Piemonte, tuttavia non si può prescindere da un certo margine d'errore al momento della sua applicazione, per via della inevitabile variabilità ad essa associata.

Per tale motivo, nel corso degli anni, si sono sviluppati alcuni metodi prevedenti la ricalibrazione continua della relazione $Z - R$ con lo scorrere del tempo. Queste tecniche di stima *a finestra di calibrazione mobile* valutano di continuo le prestazioni della relazione $Z - R$ sulla base dei dati pluviometrici più recenti, ricalibrandola di conseguenza. Un metodo di tal genere viene detto *adattivo nel tempo*, e un esempio è costituito dallo studio di Alfieri *et al.* [2] del 2010, poi portato aventi da Libertino nel 2013 con l'idea di sviluppare anche l'*adattività nello spazio* [61].

6.2.6 La riflettività logaritmica

Per chiudere, si fa una puntualizzazione sull'unità di misura del *fattore di riflettività radar*, Z, colui che abbiamo semplicemente chiamato *riflettività*. Ricordando la definizione di essa,

$$Z = \int_0^\infty N(D)\, D^6\, dD \ ,$$

e sostituendo al posto della distribuzione dei diametri delle gocce una distribuzione esponenziale generica che si spinge fino a un diametro massimo D_{max},

$$Z = \int_0^{D_{max}} N_0\, e^{-\alpha D}\, D^6\, dD \ ,$$

si perviene alla definizione di fattore di riflettività valida per una distribuzione esponenziale delle dimensioni delle gocce. Si nota che l'unità di misura di questa grandezza è un volume, e se il diametro della goccia lo si misura in [mm], l'unità di misura del *fattore di riflettività radar* è [$\mathrm{mm}^6/\mathrm{m}^3$], ovvero [$\mu\mathrm{m}^3$].

Ma se si divide Z per una *riflettività di riferimento* Z_0, associata a quella generata da una goccia di dimensioni pari a 1 mm in un volume di 1 m^3, e si fa il logaritmo di questo rapporto in modo tale da rendere meno brusche le variazioni dovute all'esponenziale, ciò che si ottiene è la cosiddetta *riflettività logaritmica* L_Z:

$$L_Z = 10\, \log_{10} \frac{Z}{Z_0} \ .$$

Come può notarsi, si tratta di una grandezza adimensionale che, all'interno di un volume di 1 m^3, compara, dopo apposita trasformazione logaritmica,

il fattore di riflettività radar calcolato per una singola goccia di 1 mm (Z_0) con quello relativo a tutte le gocce presenti nella realtà (Z). L'applicazione del logaritmo produce la definizione di *decibel*, per cui L_Z, riflettività logaritmica, rappresenta i decibel relativi a Z, ovvero i [dBZ].

Tanto il *fattore di riflettività* quanto la *riflettività logaritmica* vengono indistintamente chiamati *riflettività*, lasciando al contesto l'interpretazione. Anche il simbolo associato alle due grandezze diventa, quasi sempre, semplicemente Z.

Per fornire un esempio, se si dispone (come accade nella maggior parte dei casi) tanto del *fattore di riflettività radar* Z quanto, a seguito di un calcolo immediato, della *riflettività logaritmica* dBZ, allora, nel caso in cui si voglia utilizzare proprio quest'ultima grandezza occorre, prima di applicare una qualsiasi relazione $Z - R$, ritornare a Z eliminando il logaritmo. Ad esempio, nel caso della relazione empirica di Marshall e Palmer, si perviene a una relazione di conversione di questo tipo:

$$R = \left(\frac{10^{\frac{dBZ}{10}}}{200} \right)^{\frac{1}{1.6}} .$$

Perciò la conversione dalla *riflettività* espressa in [dBZ] all'*intensità di pioggia* non deve far uso diretto della relazione $Z - R$ originale, ma deve prima passare dal *fattore di riflettività*, espresso in [μm^3].

6.2.7 La riflettività differenziale

Esiste un altro tipo ancora di riflettività, la *riflettività differenziale*, indicata con il simbolo Z_{dr}. Questa grandezza è una delle tre principali grandezze ottenibili da un radar *di terza generazione* (le altre due sono il *fattore di riflettività* Z, che solitamente è polarizzato orizzontalmente risultando quindi $Z = Z_h$, e la *velocità Doppler* V), e può esprimersi, similmente a quanto visto per il *fattore di riflettività in forma logaritmica*, come

$$Z_{dr} = 10 \log_{10} \frac{Z_h}{Z_v} .$$

Si tratta ancora una volta di una grandezza adimensionale, ma in questo caso non quantifica la riflettività associata alle idrometeore in un volume di 1 m^3 rispetto a una riflettività di riferimento, bensì confronta Z_h e Z_v, rispettivamente dette *riflettività orizzontale* e *riflettività verticale*. Queste due quantità sono misurabili solamente dai radar *polarimetrici* di terza generazione: infatti questi ultimi sono in grado di produrre due impulsi

ogni volta, ortogonali l'uno all'altro, uno polarizzato verticalmente e l'altro polarizzato orizzontalmente. L'interazione con le gocce d'acqua dei due tipi d'impulso sarà differente, producendo i due distinti valori di riflettività appena definiti e dando luogo alla grandezza Z_{dr}.

L'informazione aggiuntiva prodotta dai radar polarimetrici riguarda la tipologia di idrometeora, dedotta dalla sua forma e dalla sua orientazione nello spazio, e una maggiore precisione nella definizione dell'intensità di pioggia. Inoltre, partecipa in modo più deciso all'eliminazione del *clutter* rispetto a quanto fatto dal solo contributo della *velocità Doppler*.

A titolo d'esempio, se la goccia d'acqua in caduta fosse sferica (eventualità poco realistica a causa della deformazione della goccia per via della gravità), le due riflettività Z_v e Z_h non avrebbero alcun motivo per non coincidere, portando il logaritmo ad annullarsi e rendendo così nullo il valore di riflettività differenziale. Ecco che è facile comprendere come una goccia di pioggia, dalla forma prettamente allungata, possa dare valori di riflettività differenziale molto diversi rispetto a quelli prodotti da un chicco di grandine, circa sferico, oppure da un fiocco di neve, a simmetria perfettamente sferica, rendendo molto facile capire quale sia la tipologia d'idrometeora intercettata.

Soddisfacendo la definizione che trasforma in unità di *decibel* una qualsiasi grandezza, la *riflettività differenziale* viene misurata proprio in [dB], senza fornire un'ulteriore connotazione relativa alla grandezza misurata come fatto con il *fattore di riflettività logaritmico*, anche detto *riflettività logaritmica*, misurato in [dBZ].

6.2.8 Fonti d'errore

Poiché la porzione d'atmosfera sulla quale conduce le misurazioni il *radar meteorologico* si trova a una certa distanza dalla superficie terrestre, l'*intensità di precipitazione* stimata dal radar può differire da quella fornita dai sistemi di misura di superficie, i *pluviometri*. Perciò, per la corretta stima della precipitazione al suolo occorre operare una opportuna correzione di quella stimata in quota dal radar meteorologico.

Oltre, tuttavia, oltre ai fenomeni che rendono la precipitazione stimata in quota differente da quella misurata a terra, vi sono tante altre fonti d'errore che rendono errata la stessa stima della precipitazione in quota. Nell'elenco che segue, stilato seguendo la schematizzazione proposta da Picco [87], si proverà a riassumere brevemente i principali motivi d'incertezza presenti elle stime da radar meteorologico:

1 – Clutter. La radiazione che torna all'antenna può essere stata retrodiffusa anche da oggetti diversi dalle idrometeore, come rilievi orografici, edifici o aerei, costituendo il cosiddetto *clutter*, principale fonte d'errore nelle stime di precipitazione mediante radar meteorologico. Tuttavia specifici algoritmi sono in grado di individuare e rimuovere pressoché totalmente quest'eco derivante principalmente dagli ostacoli topografici, permettendo di associare la radiazione retrodiffusa alla sola precipitazione.
Il *sistema Doppler* equipaggiato nei radar di seconda e terza generazione aiuta in tal senso, rimuovendo la radiazione proveniente da ostacoli che non si muovono e che, di conseguenza, non possono essere idrometeore. In più, il *radar polarimetrico* fornisce un'ulteriore contributo all'individuazione del *clutter*, sfruttando tecniche d'identificazione e rimozione basate sulla polarizzazione alternata degli impulsi radar.

2 – Attenuazione del segnale. Essendo il fascio radar costituito da onde elettromagnetiche che viaggiano in un mezzo non vuoto, l'atmosfera, risulta oggetto di un'attenuazione della potenza a esso associata. Infatti, nello spazio profondo l'attenuazione risulterebbe nulla, essendo assente qualsiasi tipo di corpuscolo, ma all'interno dell'atmosfera la presenza di atomi e molecole di varia tipologia lungo il percorso del fascio produce una certa attenuazione, ancora più marcata al passaggio attraverso corpi nuvolosi.
Poiché l'attenuazione dell'onda elettromagnetica cresce all'aumentare della sua frequenza f, e quindi al diminuire della *lunghezza d'onda* λ, il fenomeno risulta trascurabile per i radar che operano nella banda S, con $\lambda \sim 10$ cm, mentre inizia a farsi sentire per i radar nella banda C, con $\lambda \sim 6$ cm, diventando infine importante se si arriva alla banda X o alla banda K, con $\lambda \sim 2$ cm. Si può pensare, dunque, di eliminare totalmente il problema dell'attenuazione utilizzando radar in banda S, ma poiché le dimensioni dell'antenna del radar devono essere proporzionali alla *lunghezza d'onda*, ne consegue un problema d'ingombro, di stabilità meccanica dello strumento, e di costi. Per tale motivo è il radar in banda C a offrire il miglior compromesso tra problematiche di natura ingegneristica e prestazioni meteorologiche, e risulta perciò il più utilizzato.
L'attenuazione porta alla sottostima del *fattore di riflettività* Z al crescere della distanza dal radar, producendo una conseguente sottostima dell'*intensità di precipitazione*.

3 – **Occlusione del fascio.** La topografia non solo produce, come illustrato al punto **1**, echi non meteorologici, ma impedisce anche il passaggio del fascio radar, che non può così raggiungere eventuali idrometeore oltre l'ostacolo, conducendo a una sottostima del fattore di riflettività radar Z. Questa fonte d'errore si può parzialmente correggere producendo mappe di occlusione e, sulla base di queste, correggere i dati utilizzando un modello di propagazione del fascio.

4 – **Precipitazione al di sotto del fascio.** Si tratta di una fonte d'errore dovuta alla limitata copertura dello spazio tridimensionale da parte del fascio radar. Quei fenomeni meteorologici che avvengono a bassa quota, al di sotto della porzione d'atmosfera coperta dal radar, non possono essere rilevati, con conseguente sottostima della riflettività.

5 – **Evaporazione sotto il fascio radar.** Le idrometeore, durante la loro discesa, potrebbero in parte disfarsi ed evaporare se l'aria nei bassi strati atmosferici dovesse essere particolarmente secca. Questo porterebbe a una riduzione dell'intensità di pioggia al calare della quota, portando a misurazioni da pluviometro più contenute rispetto a quelle fatte dal radar ad alta quota. Questo fenomeno, perciò, al contrario dei precedenti comporta una sovrastima della precipitazione da parte del radar.

6 – **Pioggia orografica sotto il fascio.** Nel caso in cui l'area coperta dal radar meteorologico comprenda zone a orografia complessa, l'eventuale nascita di *pioggia orografica* al di sotto del fascio radar non potrebbe essere rilevata, e ciò rappresenterebbe un'ulteriore fonte di sottostima della precipitazione

7 – **Pioggia con gocce fini.** Nel caso in cui la precipitazione piovosa sia particolarmente debole (fenomeno piovoso spesso indicato con il termine *drizzle*), il radar meteorologico mostra maggiori difficoltà nel rilevarla, e ciò rappresenta un ulteriore motivo di sottostima della precipitazione al suolo.

8 – **Propagazione anomala.** Tipicamente, in condizioni normali, la temperatura T diminuisce continuamente al crescere della quota, determinando un grediente ∇T sempre negativo. Nel caso, però, di condizioni atmosferiche caratterizzate da una certa *stabilità*, non è infrequente che si verifichi il fenomeno dell'*inversione termica*, con la nascita di uno strato d'atmosfera intermedio in cui la temperatura

inverte il suo andamento e, dopo essere diminuita nel primo strato d'atmosfera a contatto con la superficie terrestre, inizia ad aumentare. Ciò determina un ∇T positivo all'interno dello *strato d'inversione termica*, per poi riprendere l'andamento classico e tornare a diminuire con la quota.
Questo fenomeno influisce sulla propagazione del fascio radar in quanto, all'interno dello strato d'atmosfera superficiale, ovvero sotto lo strato d'inversione, un accumulo di vapor d'acqua modifica la distribuzione del valore dell'indice di rifrazione atmosferico, modificando di conseguenza la direzione di propagazione del fascio, non più rettilinea. Si parla allora di *propagazione anomala* (spesso abbreviata con la sigla ANAPROP) del fascio, che viene deviato verso il terreno e ha più probabilità d'incontrare ostacoli orografici, con conseguente falsificazione dell'eco radar.

9 – Fenomeno della *bright band*. Si tratta di un fenomeno legato allo *strato atmosferico di fusione* (in lingua inglese *melting layer*), ovvero a quello strato in cui le idrometeore ghiacciate, entrando in un ambiente con temperatura al di sotto della temperatura di congelamento, fondono, portando la neve a trasformarsi in acqua. L'intersezione del fascio radar con questo strato conduce a un improvviso aumento della riflettività misurata, e ciò si deve alle diverse proprietà dielettriche delle idrometeore intercettate dalle microonde.
La sovrastima può essere anche molto spinta (anche fino a 10 volte), rendendo necessario lo sviluppo di metodi che correggano appositamente i risultati. Il nome con cui si indica il fenomeno deriva proprio dalla forte intensificazione della riflettività misurata, come se si fosse intercettato uno strato atmosferico *abbagliante* (in inglese, appunto, *bright band*, oppure *boy band* come affettuosamente rinominata dalla coinquilina dell'autore di questo studio).

10 – Conversione da riflettività a intensità di pioggia. Poiché, come già detto nelle pagine precedenti, la grandezza che può misurarsi direttamente da radar non è l'*intensità di precipitazione*, bensì la *potenza di backscattering* P_r, e da questa il *fattore di riflettività* Z secondo l'equazione (6.1), l'uso di una relazione $Z - R$ piuttosto che un'altra conduce inevitabilmente a un errore dovuto alla conversione. Infatti, non esiste una relazione di conversione riconosciuta *ottimale* in tutte le situazioni, ma quest'ultima varia di continuo, tanto nello spazio quanto nel tempo, all'interno dello stesso fenomeno piovoso e

al variare di esso, oltre che al modificarsi dell'area geografica su cui questo avviene e della stagione in cui si verifica.

11 – Instabilità nel funzionamento del radar. Può accadere che l'impulso generato dal radar sia soggetto a variazioni d'intensità nel tempo, e questo fenomeno è riconducibile al nascere di un'instabilità all'interno dell'apparato di amplificazione del segnale elettromagnetico. Modificandosi l'intensità dell'impulso trasmesso nell'atmosfera, si modifica di conseguenza l'intensità dell'eco radar di ritorno, portando a variazioni nelle stime della riflettività.

Per via di tutte le fonti d'errore appena elencate, l'intensità di precipitazione stimata tramite radar, R, risulta differente da quella misurata al suolo, R_s, per cui un'idea è stata quella di correggere in tempo reale le misure da radar operando il confronto immediato con le stime da pluviometro. Questo processo viene denominato *calibrazione del radar*, e non sarebbe possibile senza l'esistenza della rete pluviometrica, perciò fondamentale.

Anche lo strumento *pluviometro*, tuttavia, non è perfetto nella stima dell'intensità di pioggia al suolo, ma si tratta di un argomento che non sarà approfondito in questa sede.

In FIGURA 6.2, tratta da Collier [24], vengono rese graficamente sei delle undici tipologie d'errore elencate, lasciando all'immaginazione del lettore le restanti cinque.

6.3 I radar gestiti da ARPA Piemonte

Nel presente lavoro di tesi saranno utilizzati dati da radar meteorologico generati e forniti da ARPA Piemonte, l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale sul territorio piemontese. Sono due i radar che l'ARPA gestisce, entrambi operanti nella Banda C delle microonde: il radar di Bric della Croce, collocato sulla collina di Torino, e il radar di Monte Settepani, installato invece nella Regione Liguria.

6.3.1 Il radar di Bric della Croce

Il radar meteorologico di Bric della Croce, posto a 736 m sul livello del mare, si erge sulla sommità dell'omonimo rilievo collinare a sud-est della città di Torino, venendo a cadere all'interno del comune di Pecetto Torinese. Posto in cima a una torre alta 33 m, riesce a coprire l'intero Piemonte.

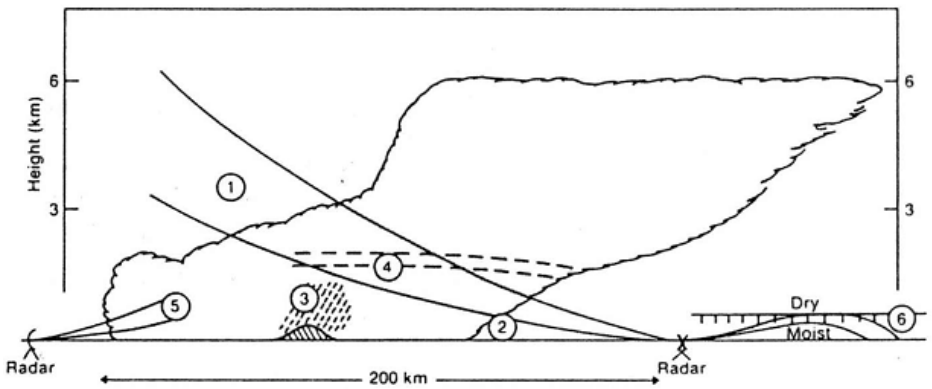


FIGURA 6.2: **Alcune fonti d'incertezza nelle stime da radar.** Nella figura soprastante [24] vengono schematicamente presentate sei fonti d'errore che s'incontrano nella stima della riflettività radar. Indicata con il numero 1, la presenza di precipitazione al di sotto del fascio radar, in questo caso a causa del divergere del fascio a grande distanza dal radar; con il numero 2, l'evaporazione negli strati atmosferici più bassi, non intercettata dal fascio radar; con il numero 3, la precipitazione orografica, non intercettata se si consuma a bassa quota; con il numero 4, il fenomeno della *bright band*; con il numero 5, la sottostima dell'intensità di pioggia per via dell'assenza di gocce grandi (*drizzle*); e infine, con il numero 6, la propagazione anomala del fascio radar.

Tuttavia, essendo posizionato nel mezzo della regione, la sua visuale è occultata su tre dei quattro lati: nei settori Nord e Ovest dalla catena alpina, nel settore Sud da quella appenninica, lasciando piena visibilità solamente sul settore Est [108]. Spesso indicato semplicemente come *radar Bric della Croce*, fa parte della stazione meteorologica di Torino–Bric della Croce, stazione di riferimento per il Servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare e per l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM).

Dal 1999 il radar Bric della Croce è diventato un radar *di terza generazione*, inglobando tanto un sistema Doppler quanto un sistema polarimetrico. Le grandezze che può fornire sono, pertanto, la *riflettività polarizzata orizzontalmente* Z_h, misurata in [dBZ], la *velocità Doppler* V e il suo spettro σV, e la *riflettività differenziale* Z_{dr}.

Il funzionamento operativo del radar prevede, attualmente, una scansione volumetrica ogni 5 minuti (fino a non molti anni fa, invece, la frequenza di scansione era di 10 minuti), e consta di due tipologie di scansioni:

1. **Primaria** – Scansione a elevata PRF, condotta usando 11 valori di elevazione differenti, da $-0.1°$ a $28.5°$ (si veda la FIGURA 6.3), e comprensiva dell'acquisizione di Z_h, V e Z_{dr} oltre a poche altre grandezze. É finalizzata a misure quantitative;

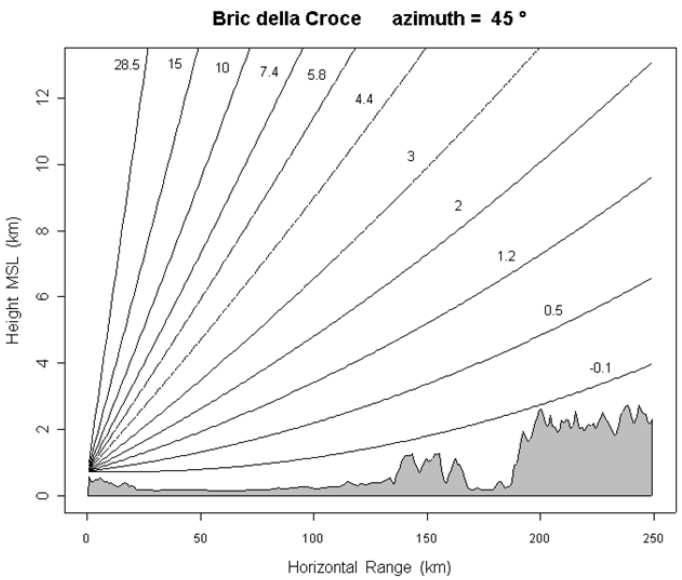


FIGURA 6.3: **Elevazioni del fascio del radar Bric della Croce.** Nella figura, tratta da Bechini e Cremonini [11], sono mostrati schematicamente gli angoli associati alle undici elevazioni della scansione volumetrica primaria del radar Bric della Croce. Nello specifico, in figura viene mostrata la propagazione dei fasci per la specifica topografia relativa alla sezione verticale con azimut di 45°. Si nota che la propagazione dei fasci non è rettilinea, ma tende a divergere verso l'alto, e ciò è dovuto alla variazione di umidità relativa al modificarsi della quota.

2. **Secondaria** – Scansione a ridotta PRF, condotta per 4 elevazioni solamente, e non comprensiva della misura di Z_{dr}. É finalizzata al generico monitoraggio del cielo.

La risoluzione angolare associata al posizionamento del fascio radar è di 1°, e la durata dell'impulso elettromagnetico è di 0.5μs. La copertura del radar Bric della Croce è, attualmente, maggiore rispetto a quella del radar Settepani, e si estende su di un'area circolare di raggio 170 km. Tuttavia frequenti aggiornamenti estendono in continuazione il range spaziale dei due radar.

Mediante l'elaborazione in tempo reale delle misure radar non solo è possibile condurre il monitoraggio dell'intensità di precipitazione, della velocità del vento e della presenza di grandine entro alcune centinaia di chilometri dall'ubicazione del radar, ma è anche possibile condurre previsioni a brevissimo termine (motivo di questo studio) di fenomeni precipitativi, anche piuttosto intensi. Inoltre è possibile fornire previsioni di piena: l'utilizzo congiunto dei radar e della rete di monitoraggio al suolo permette,

attraverso una stima ottimale della quantità di precipitazione sull'intero territorio regionale, l'inizializzazione di modelli idrologici, e il conseguente confezionamento di una previsione che consenta di determinare la necessità di perpetrare un allarme idrologico o meno.

6.3.2 Il radar di Monte Settepani

Il radar meteorologico di Monte Settepani si colloca a una quota di 1 386 m sul livello del mare, all'interno del comune di Calizzano, in provincia di Savona. ARPA Piemonte, in collaborazione con il Settore di Protezione Civile della Regione Liguria, gestisce anche questo radar in aggiunta al Bric della Croce, estendendo l'area geografica coperta.

Installato dalle Regioni Liguria e Piemonte nel corso del Progetto dell'Unione Europea INTERREG IIc, il radar di Monte Settepani, spesso indicato semplicemente come *radar Settepani*, è dislocato in una posizione strategica per il monitoraggio della precipitazione proveniente dal Mar Mediterraneo, spesso motivo d'importanti eventi idrologici. In più il radar Settepani, essendo più distante dalla catena Alpina oltre che più elevato rispetto al radar Bric della Croce, ha una migliore visibilità sui settori Nord ed Est, compensando le carenze del radar piemontese.

A differenza del radar Bric della Croce, il radar Settepani conduce una scansione volumetrica ogni 10 minuti invece che ogni 5, abbassando la risoluzione temporale delle misure. La scansione è solo una, a elevata PRF, condotta usando 7 valori di elevazione differenti, da $-0.3°$ a $14.9°$, e prevede l'acquisizione delle stesse grandezze del radar Bric della Croce: Z_h, V e Z_{dr}.

La risoluzione angolare associata al posizionamento del fascio radar è anche qui di $1°$, e la durata dell'impulso elettromagnetico è di 0.5μs. Il radar Settepani copre, attualmente, un'area circolare di raggio pari a 136 km, più ridotta rispetto all'area coperta dal radar Bric della Croce. A questo proposito, la FIGURA 6.4, oltre a mettere in luce l'allontanamento progressivo del fascio radar dalla superficie terrestre, mostra la differente copertura dei due radar, evidenziando un'ampia zona d'intersezione, con il radar Bric della Croce che partecipa quasi completamente alla copertura del radar Settepani.

6.3.3 Elaborazioni condotte dall'ARPA

Essendoci un'ampia zona d'intersezione tra le coperture associate ai due radar meteorologici monitorati, l'ARPA Piemonte ha sperimentato la co-

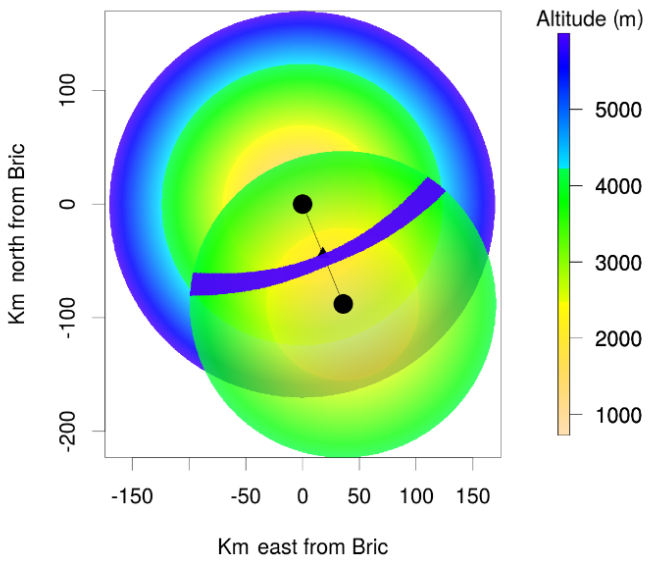


FIGURA 6.4: **Copertura dei radar Bric della Croce e Monte Settepani.** Nella figura, tratta da Vaccarono *et al.* [108], viene mostrata la copertura dei due radar, e l'ampia zona coperta da entrambi. In più, nello specifico, viene mostrato l'andamento dell'altitudine dell'asse centrale associato al lobo principale del fascio prodotto dai due radar, con l'allontanarsi da essi. Nello specifico, viene considerato per il radar Bric (posto nel punto nero più alto) il fascio radar con la terza elevazione, 1.2°, e per il radar Settepani (posto nel punto nero più basso) il fascio radar con la seconda elevazione, 0.7°. La fascia blu scuro tra i due radar rappresenta la zona in cui i due lobi principali si sovrappongono.

siddetta *mosaicatura* tra i dati dei due radar, pervenendo a una migliore stima della precipitazione all'interno della zona coperta da entrambi.

Oltre all'operazione di *mosaicatura*, dante vita a un prodotto radar *composito*, un'altra operazione che viene spesso condotta direttamente dall'ARPA è quella di *correzione* dei dati radar (affetti dalle svariate fonti d'errore elencate qualche pagina fa).

Difatti, all'interno dell'area osservata dai radar, l'orografia complessa e la variabilità della propagazione del fascio radar minano la correttezza delle osservazioni e delle misurazioni. Per questa ragione, al dato radar grezzo vengono applicati diversi processi di correzione finalizzati all'eliminazione degli echi non meteorologici dovuti ai rilievi orografici (si parla di *ground clutter*, uno specifico *clutter* dovuto agli ostacoli di superficie) e alla correzione della variazione verticale della riflettività. In particolare, sui dati grezzi ottenuti dal radar di Bric della Croce, ad esempio, viene applicato un algoritmo di rimozione del *ground clutter* basato su tre test successivi [87]:

1. **Test Doppler:** come già accennato, per identificare gli ostacoli che non siano idrometeore ci si basa sull'*immobilità* degli ostacoli orografici, individuata misurando la *velocità Doppler*. Tuttavia, a causa dell'esistenza di sistemi di precipitazione quasi stazionari, questo test può generare un certo errore, motivo per cui dev'essere abbinato a qualche altro test;

2. **Clutter statistico:** questo test utilizza la differenza tra il valore di riflettività polarizzata orizzontalmente Z_h misurato in tempo reale in presenza di pioggia, e il corrispondente valore di Z_h derivato da mappe statistiche in condizioni di aria non presentante precipitazione. Se questa differenza è minore di una certa soglia (ad esempio 10 dB), il test è positivo al *clutter*;

3. **Varianza della $\mathbf{Z_{dr}}$:** la *riflettività differenziale* mostra tipicamente una grande variabilità in presenza di *clutter*. Di conseguenza, la variazione della deviazione standard di Z_{dr} può servire, oltrepassata una certa soglia, per identificarlo.

Quando almeno due test su tre sono contemporaneamente positivi alla presenza di clutter, la misura viene dichiarata contaminata.

Inoltre, per ottenere l'intensità di precipitazione R è necessario disporre di mappe di riflettività in due dimensioni. Il dato radar grezzo, tuttavia, è un dato *volumetrico*, definito nello spazio tridimensionale. Per questo motivo un'altra elaborazione condotta dall'ARPA consiste nella trasformazione del dato volumetrico in dato bidimensionale mediante l'utilizzo di una Mappa di Elevazione Digitale. In più, i dati di riflettività sono corretti dall'errore nella stima verticale della riflettività (dovuta soprattutto all'orografia complessa e all'interazione del fascio con lo strato di congelamento e con quello di fusione) facendo uso dei cosiddetti *Profili Verticali di Riflettività* (spesso abbreviati con l'acronimo inglese VPR), stimati mediando nel tempo il dato volumetrico grezzo relativo ad ampie aree spaziali.

6.3.4 La maschera di visibilità

La visibilità associata ai radar di Bric della Croce e di Monte Settepani dipende strettamente dalla specifica orografia che il fascio radar incontra nel propagarsi in atmosfera. In misura minore, però, dipende anche dal grado di umidità presente nell'aria scandagliata dal fascio.

Limitandosi all'impedimento causato dal blocco orografico, in FIGURA 6.5 viene riportata, mediante una mappa cromatica bidimensionale, la

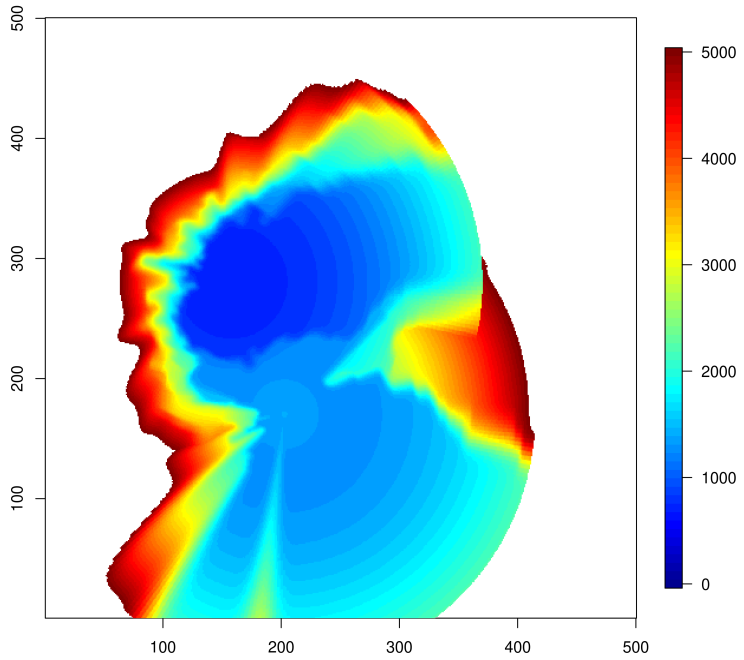


FIGURA 6.5: **Maschera di visibilità dei due radar.** La mappa soprastante, fornita da ARPA Piemonte, definisce mediante una scala cromatica l'altezza minima del fascio radar libero da blocco orografico per ciascun punto dello spazio coperto dal mosaico dei due radar. In realtà non proprio per ciascun punto, in quanto ci si è limitati a graficare i punti con altezza minima del fascio libero da blocco non oltre i 5 000 m, definendo una *maschera di visibilità*. Si veda la FIGURA 6.6 per l'andamento completo della visibilità, oltre che per la georeferenziazione della maschera.

minima quota necessaria per una propagazione del fascio libera da qualsiasi ostacolo orografico. Al di sotto della quota indicata in un certo punto dello spazio, non si può disporre di osservazioni radar.

Tipicamente ARPA Piemonte utilizza, come *limite di visibilità*, 5 000 m, non considerando l'eco radar proveniente da punti dello spazio con altezza minima del fascio libero da blocco oltre questa soglia. Difatti, quest'eco risulterebbe portatore solamente di una parte delle informazioni, non avendo alcun dato su uno strato atmosferico spesso ben 5 chilometri. Per tale motivo, in FIGURA 6.5 sono mostrati solamente i punti entro questo limite.

Si noti come il radar Bric della Croce, in alto, abbia una visibilità molto limitata in direzione nord-ovest, a causa del blocco orografico costituito dalla catena alpina, mentre il radar Settepani presenti una buona visibilità in più direzioni.

Applicando questa maschera di visibilità alle scansioni contenute nel-

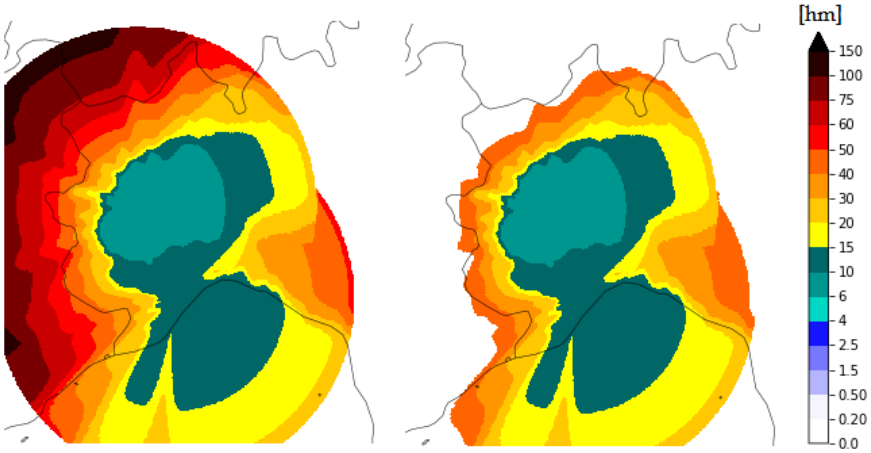


FIGURA 6.6: **Visibilità del fascio con georeferenziazione.** Nella figura di sinistra viene mostrata, questa volta con la georeferenziazione, l'altezza minima del fascio libero da blocco per l'intera zona geografica coperta dal mosaico dei due radar. Si nota che la scala cromatica esprime le centinaia di metri, ovvero gli ettometri, [hm]. A destra, invece, viene selezionata l'area con altezza minima del fascio libero da blocco entro i 5 000 m, come mostrato con maggior dettaglio (ma senza georeferenziazione) in FIGURA 6.5.

l'archivio radar di cui si disporrà, ne risulterà l'eliminazione dei dati associati a punti dello spazio con quota minima del fascio libero da blocco oltre i 5 000 metri.

La mappa di visibilità completa è mostrata in FIGURA 6.6, in cui l'aggiunta di georeferenziazione permette di collocarla geograficamente. A sinistra, la visibilità senza limitarsi ai punti con un valore di altezza minima del fascio sotto una certa soglia, mostrando in tal modo anche la copertura del mosaico dei due radar, mentre a destra la maschera di visibilità dopo l'applicazione della soglia limite. Si noti l'unita di misura con cui sono espressi i valori di questi due grafici: si tratta di centinaia di metri, ovvero *ettometri*, [hm].

6.4 Gli eventi a disposizione

Ai fini del presente lavoro, dedicato all'esplorazione delle potenzialità previsionali associabili al *metodo per analoghi* applicato su zone a orografia complessa, si rendeva necessario un archivio storico di dati radar che fosse il più ampio possibile. Per quanto i dubbi sul costo computazionale relativo alla messa in opera di un metodo di questo tipo su un comune elaboratore elettronico non fossero pochi, ci si è comunque avventurati nel proposito

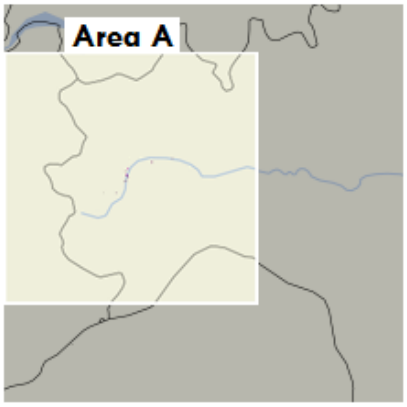


FIGURA 6.7: **Area geografica A.** Nella figura soprastante, in grigio chiaro, viene mostrata l'area geografica coperta dai dati relativi ai 19 eventi utilizzati da Alfieri [1]. In grigio scuro, invece, si è riportato il contesto geografico circostante (che costituirà l'area geografica coperta da altri, successivi dati).

iniziale, dando il via alla prima fase dello studio (dopo la lunga fase zero relativa all'*analisi della bibliografia* tematica): la *raccolta di dati storici*. Qualsiasi studio che voglia testare un nuovo metodo di previsione non può prescindere, infatti, dall'utilizzo di dati d'esempio relativi al passato, sui quali testare i nuovi algoritmi.

6.4.1 I primi 19 eventi

Questo primissimo obiettivo ha inizialmente portato all'ottenimento dei dati radar utilizzati da Alfieri nell'ambito del suo studio di dottorato [1]. Si tratta di 19 eventi precipitativi abbattutisi nella zona nord-occidentale della penisola italiana tra il 2003 e il 2006. Nello specifico, questi dati coprono il territorio piemontese quasi per intero, quello ligure per buona parte, e quello valdostano completamente. L'area geografica quadrata interessata da questi dati verrà chiamata, nel seguito, *Area A* (si veda la FIGURA 6.7).

La selezione che ha portato Alfieri alla scelta di questi 19 eventi piovosi si basava sulla *precipitazione media cumulata* di pioggia giornaliera, individuando quegli eventi con associati i valori più alti all'interno della finestra temporale tra il 2003 e il 2006. La durata di ciascun evento varia molto, dalle poche ore sino ai 3 giorni consecutivi. I dati a disposizione per ciascun evento, tuttavia, coprono almeno 24 h, risultando quasi sempre multipli di questa quantità (eccetto per tre casi isolati, di cui si hanno a disposizione meno di 24 h di dati). Le giornate interessate sono 27, co-

me viene dettagliato in TABELLA 6.2, fornendo anche un carattere medio, *stratiforme* oppure *convettivo*, ai fenomeni piovosi in esse contenuti.

La *risoluzione temporale* associata ai dati radar di questi 19 eventi, ovvero la distanza temporale tra due scansioni radar successive, è di 10 minuti. Si dispone, pertanto, di mappe bidimensionali di *riflettività logaritmica* (ovvero di mappe presentanti il campo del *fattore di riflettività* Z trasformato in *decibel*, e perciò misurato in [dBZ], ma d'ora in avanti indicato semplicemente come *riflettività*) ogni 10 minuti, per un totale di 144 mappe di riflettività radar per ciascun giorno coperto integralmente dai dati radar.

La *risoluzione spaziale*, ovvero il livello di dettaglio relativo alla singola cella di riflettività, è invece di 500.4 m. Ciò significa che ogni singolo valore di riflettività si riferisce a una *cella geografica*, ovvero a un fazzoletto di terreno, di lato pari a $\Delta x = 500.4\,\mathrm{m}$. Per ciascuna mappa radar si dispone di 250 000 valori di riflettività, disposti all'interno di una matrice quadrata 500 x 500 che copre l'intera *Area A*. Svolgendo il calcolo, si tratta di un'area geografica di lato $L = 250,2\,\mathrm{km}$, coperta da celle geografiche che, se pensata ciascuna come un *pixel* portante con sé un certo valore, da vita a una mappa colorata in base ai valori di riflettività, e sarà esattamente in tale modo che si presenteranno visivamente gli echi radar. Per ulteriori dettagli sulle caratteristiche dell'Area A, si veda la TABELLA 6.3.

Per individuare geograficamente l'Area A, viene utilizzato il sistema di coordinate geografiche ED1950 UTM, basato sulla *proiezione universale trasversa di Mercatore*, con datum ED1950[3]. Il dato contenuto all'interno degli echi radar a disposizione, che come già sottolineato è il *fattore di riflettività logaritmica*, Z, misurato in [dBZ], è già ripulito dal *clutter* e da altre fonti d'errore. Il radar meteorologico coinvolto è solamente il Bric della Croce, la cui area circolare di scansione è posizionata esattamente al centro dell'Area A e ne tange i quattro lati (si veda la FIGURA 6.8).

[3]Il sistema di coordinate geografiche ED1950 UTM utilizza l'*European Datum 1950* con riferimento all'ellissoide Internazionale di Hayford (1924). Il *sistema di proiezione* utilizzato è l'UTM (*Universal Transverse Mercator*), che si basa sulla proiezione trasversa di Mercatore. Nell'UTM, la superficie terrestre viene suddivisa in 60 *fusi* verticali di 6° di ampiezza longitudinale l'uno, e ciascuno di questi è suddiviso a sua volta in 20 *fasce* di 8° di latitudine. Le intersezioni tra fusi e fasce individuano le *zone*. Il territorio italiano è all'interno dei fusi 32 e 33 e, per una piccola parte, nel fuso 34 (in cui capita la parte più orientale della Puglia). Nell'ED50 UTM, al meridiano centrale di ogni fuso viene assegnata una *falsa coordinata di easting* con valore fittizio di 500.000 m, mentre la *coordinata di northing* è definita dalla distanza in metri rispetto all'equatore. Perciò è sempre necessario comunicare, oltre alle coordinate, il numero del fuso a cui si fa riferimento, senza il quale risulta impossibile la localizzazione.

Evento	Data	Area	Δt	Carattere
1	2 Giugno 2003	A	10 min	convettivo
2	8 Settembre 2003 9 Settembre 2003	A	10 min	convettivo stratiforme
3	6 Novembre 2003 7 Novembre 2003	A	10 min	stratiforme
4	19 Febbraio 2004 20 Febbraio 2004 21 Febbraio 2004	A	10 min	stratiforme
5	4 Agosto 2004	A	10 min	convettivo
6	10 Agosto 2004	A	10 min	convettivo
7	29 Novembre 2004	A	10 min	stratiforme
8	30 Marzo 2005	A	10 min	stratiforme
9	15 Aprile 2005 16 Aprile 2005	A	10 min	stratiforme
10	17 Maggio 2005	A	10 min	stratiforme
11	20 Agosto 2005	A	10 min	convettivo
12	8 Settembre 2005	A	10 min	stratiforme
13	9 Settembre 2005	A	10 min	stratiforme
14	8 Maggio 2006	A	10 min	stratiforme
15	10 Maggio 2006	A	10 min	stratiforme
16	24 Giugno 2006	A	10 min	stratiforme
17	25 Luglio 2006	A	10 min	convettivo
18	13 Settembre 2006 14 Settembre 2006 15 Settembre 2006	A	10 min	stratiforme stratiforme convettivo
19	24 Settembre 2006 25 Settembre 2006	A	10 min	stratiforme

Tabella 6.2: **Eventi 1–19.** All'interno della tabella soprastante sono elencati i 19 eventi facenti parte del bagaglio d'eventi usato da Alfieri [1]. Alcuni eventi sono contenuti all'interno di un'unica giornata, altri si sviluppano su più giorni. L'ultima colonna contiene la tipologia d'evento, a carattere prevalentemente *convettivo* oppure *stratiforme*, definita sulla base delle indicazioni che saranno fornite in seguito all'interno della sezione intitolata *La classificazione degli eventi.*

	AREA A
Lato	$250,2\,\mathrm{km}$
Radar	Bric della Croce
Numero di pixel	500 x 500
Risoluzione spaziale (Δx)	$500.4\,\mathrm{m}$
Risoluzione temporale (Δt)	10 min
Datum geodetico	ED1950
Sistema di proiezione	UTM
$\mathbf{x_{LL}}$	$275\,176\,\mathrm{m}$
$\mathbf{y_{LL}}$	$4\,862\,611\,\mathrm{m}$

TABELLA 6.3: **Caratteristiche dell'Area A.** In tabella sono elencate le principali caratteristiche che contraddistinguono l'*Area A*. Le ultime due righe contengono le coordinate ED1950 UTM dell'angolo in basso a sinistra (*Lower Left*, LL) del grigliato spaziale e, note quelle, è possibile ricavare le coordinate di qualsiasi punto dell'Area A essendo nota la risoluzione spaziale Δx.

FIGURA 6.8: **Copertura del radar Bric della Croce nell'Area A.** In figura viene mostrata la copertura del radar Bric della Croce in relazione all'Area A. Si nota che l'area scansionata dal radar Bric descrive un cerchio perfettamente inscritto nell'Area A, perciò centrata sul radar, il cui posizionamento è indicato dal pallino rosso. Quello verde, invece, identifica la posizione del radar Monte Settepani, non utilizzato per gli eventi dell'Area A.

I dati radar dei 19 eventi Alfieri, essendo memorizzati all'interno di file in formato binario con estensione *.flt*, sono stati aperti mediante l'ambiente per il calcolo numerico MATLAB e, una volta letti, sono stati salvati in matrici 500 x 500 all'interno di file con estensione *.mat*. L'elaborazione di questi dati è, successivamente, avvenuta facendo uso del linguaggio di programmazione Python, con il quale si è provveduto allo sviluppo di tutto il codice sorgente per il processamento dei dati radar. L'esecuzione del codice Python è avvenuta in *Jupyter Notebook* (precedentemente noto come *Ipython Notebook*), un ambiente computazionale interattivo in cui è possibile eseguire codice scritto in diversi linguaggi di programmazione.

6.4.2 Gli eventi dal 20 al 38

Con l'obiettivo di ottenere il maggior numero di dati radar possibile, si è arrivati a disporre, grazie al professor Pierluigi Claps, di ulteriori osservazioni da radar relative agli anni dal 2003 al 2007, e riguardanti la medesima *Area A* descritta nel precedente paragrafo (si veda nuovamente la TABELLA 6.3 per i dettagli). Ancora una volta si tratta di eventi con associata una cumulata giornaliera notevole, indice del fatto che si tratti di eventi piovosi intensi. La durata di ciascun evento varia molto anche in questo caso, dalle poche ore sino ai 4 giorni consecutivi. I dati a disposizione per ciascun evento coprono almeno la durata di un giorno intero, ad eccezione di due casi, di cui si dispone di meno di 24 h di osservazioni. Le giornate interessate sono questa volta 35, come dettagliato nella TABELLA 6.4 e nella TABELLA 6.5.

L'unica differenza rispetto ai dati del primo gruppo di eventi (quelli dall' 1 al 19) si è riscontrata nel formato in cui erano memorizzati: non più in formato binario all'interno di file con estensione *.flt*, bensì in formato testuale semplice in file con estensione *.asc*, tipologia di estensione caratterizzante file con codifica ASCII. Perciò non si è resa necessaria la fase di lettura tramite i tool di MATLAB, ed è stato possibile aprirlo e leggerlo direttamente in Python, salvandone i dati in matrici 500 x 500.

6.4.3 Gli eventi dal 39 all'81

Alla ricerca di ulteriori dati osservativi che potessero rendere ancora più profondo il database all'interno del quale condurre la ricerca degli analoghi, si è riusciti a ottenere, grazie al disponibilissimo gruppo di radaristi dell'ARPA Piemonte (in particolare grazie al dottor Renzo Bechini), altri

Evento	**Data**	**Area**	**Δt**	**Carattere**
20	27 Luglio 2003	A	10 min	convettivo
21	31 Ottobre 2003 1 Novembre 2003	A	10 min	stratiforme
22	1 Dicembre 2003	A	10 min	stratiforme
23	2 Dicembre 2003	A	10 min	stratiforme
24	3 Dicembre 2003 4 Dicembre 2003	A	10 min	stratiforme
25	25 Ottobre 2004 26 Ottobre 2004	A	10 min	stratiforme convettivo
26	27 Ottobre 2004 28 Ottobre 2004 29 Ottobre 2004	A	10 min	stratiforme stratiforme convettivo
27	30 Ottobre 2004 31 Ottobre 2004 1 Novembre 2004 2 Novembre 2004	A	10 min	stratiforme
28	17 Aprile 2005	A	10 min	stratiforme
29	2 Agosto 2005	A	10 min	convettivo
30	6 Settembre 2005 7 Settembre 2005	A	10 min	stratiforme
31	10 Settembre 2005 11 Settembre 2005 12 Settembre 2005	A	10 min	stratiforme convettivo stratiforme
32	6 Luglio 2006	A	10 min	convettivo
33	12 Luglio 2006	A	10 min	convettivo

Tabella 6.4: **Eventi 20–33.** In tabella, la prima parte del secondo gruppo di eventi, quelli dal 20 al 38. Rispetto al primo gruppo dall'evento 1 al 19, gli eventi del secondo gruppo si distinguono solamente per il formato del dato, non binario bensì in testo semplice.

Evento	Data	Area	Δt	Carattere
34	1 Maggio 2007 2 Maggio 2007	A	10 min	convettivo
35	3 Maggio 2007 4 Maggio 2007	A	10 min	stratiforme
36	25 Maggio 2007 26 Maggio 2007 27 Maggio 2007 28 Maggio 2007	A	10 min	convettivo convettivo convettivo stratiforme
37	8 Agosto 2007	A	10 min	convettivo
38	30 Agosto 2007	A	10 min	convettivo

TABELLA 6.5: **Eventi 34–38.** In tabella, la seconda parte del secondo gruppo di eventi, quelli dal 20 al 38.

43 eventi precipitativi, questa volta coprenti il periodo dal 2008 al 2020 e, aggiungendosi ai precedenti, costituenti gli eventi dal 39 all'81.

Il criterio di selezione di questi ultimi all'interno degli archivi dell'ARPA è stato quello di *precipitazione media cumulata* sulla regione Piemonte nelle 24 h maggiore di 50 mm. Questo criterio permette di garantire che la maggior parte degli eventi abbia una componente di *pioggia orografica* rilevante. All'interno delle TABELLE 6.6 e 6.7 vengono elencati i 43 eventi relativi all'*Area B*, numerati dal 39 all'81 e comprensivi di 53 giornate di osservazioni, tutte interamente coperte da 24 h di dati se non fosse per alcune isolate scansioni vacanti.

La novità principe relativa a questi nuovi eventi riguarda l'area geografica su cui sono forniti i dati di riflettività. Difatti, si tratta di un'area notevolmente più ampia rispetto all'*Area A*, coinvolgente questa volta le regioni Piemonte, Val d'Aosta e Liguria per intero, quasi tutta la Lombardia e buona parte di Emilia-Romagna e Toscana. In FIGURA 6.9 viene fatto il confronto visivo tra quest'area, che d'ora in avanti sarà indicata come *Area B*, e l'area relativa agli eventi da 1 a 38, l'*Area A*.

La *risoluzione temporale* associata ai dati radar di questi 43 eventi è variabile. Solamente i primi 5 eventi, relativi al 2008, continuano a essere scanditi da immagini radar ogni 10 minuti, mentre i restanti eventi, dal 2009 al 2020, hanno risoluzione temporale raddoppiata, e sono descritti da mappe radar ogni 5 minuti. Ancora una volta si tratta di mappe bidimensionali portanti il campo di *riflettività logaritmica*, in [dBZ], per un totale

Evento	**Data**	**Area**	**Δt**	**Carattere**
39	29 Maggio 2008	B	10 min	convettivo
40	29 Ottobre 2008	B	10 min	stratiforme
41	4 Novembre 2008 5 Novembre 2008	B	10 min	stratiforme
42	30 Novembre 2008	B	10 min	stratiforme
43	10 Dicembre 2008	B	10 min	stratiforme
44	29 Novembre 2009	B	5 min	stratiforme
45	30 Novembre 2009	B	5 min	stratiforme
46	4 Maggio 2010 5 Maggio 2010	B	5 min	convettivo stratiforme
47	15 Giugno 2010 16 Giugno 2010	B	5 min	stratiforme
48	31 Ottobre 2010 1 Novembre 2010	B	5 min	stratiforme
49	15 Marzo 2011 16 Marzo 2011	B	5 min	stratiforme
50	1 Giugno 2011	B	5 min	stratiforme
51	5 Novembre 2011 6 Novembre 2011	B	5 min	stratiforme
52	8 Novembre 2011	B	5 min	stratiforme
53	1 Maggio 2012	B	5 min	stratiforme
54	21 Maggio 2012	B	5 min	stratiforme
55	16 Maggio 2013	B	5 min	stratiforme
56	25 Dicembre 2013 26 Dicembre 2013	B	5 min	stratiforme
57	13 Ottobre 2014	B	5 min	convettivo
58	4 Novembre 2014 5 Novembre 2014	B	5 min	convettivo stratiforme

TABELLA 6.6: **Eventi 39–58.** In tabella è presentato il primo gruppo di eventi relativi all'*Area B*. A seguire il secondo gruppo, in TABELLA 6.7.

Evento	Data	Area	Δt	Carattere
59	11 Novembre 2014	B	5 min	stratiforme
60	15 Novembre 2014	B	5 min	stratiforme
61	13 Settembre 2015	B	5 min	convettivo
62	3 Ottobre 2015	B	5 min	convettivo
63	11 Maggio 2016	B	5 min	convettivo
64	14 Ottobre 2016	B	5 min	convettivo
65	22 Novembre 2016 23 Novembre 2016	B	5 min	stratiforme
66	5 Novembre 2017	B	5 min	stratiforme
67	8 Gennaio 2018	B	5 min	stratiforme
68	11 Aprile 2018	B	5 min	stratiforme
69	11 Ottobre 2018	B	5 min	stratiforme
70	28 Ottobre 2018 29 Ottobre 2018	B	5 min	stratiforme convettivo
71	1 Novembre 2018	B	5 min	stratiforme
72	6 Novembre 2018	B	5 min	stratiforme
73	23 Aprile 2019	B	5 min	stratiforme
74	15 Luglio 2019	B	5 min	stratiforme
75	15 Ottobre 2019	B	5 min	convettivo
76	21 Ottobre 2019	B	5 min	convettivo
77	24 Ottobre 2019	B	5 min	stratiforme
78	23 Novembre 2019 24 Novembre 2019	B	5 min	stratiforme
79	20 Dicembre 2019	B	5 min	stratiforme
80	11 Maggio 2020	B	5 min	stratiforme
81	2 Ottobre 2020	B	5 min	stratiforme

Tabella 6.7: **Eventi 59–81.** In tabella, il secondo gruppo di eventi relativi all'*Area B*.

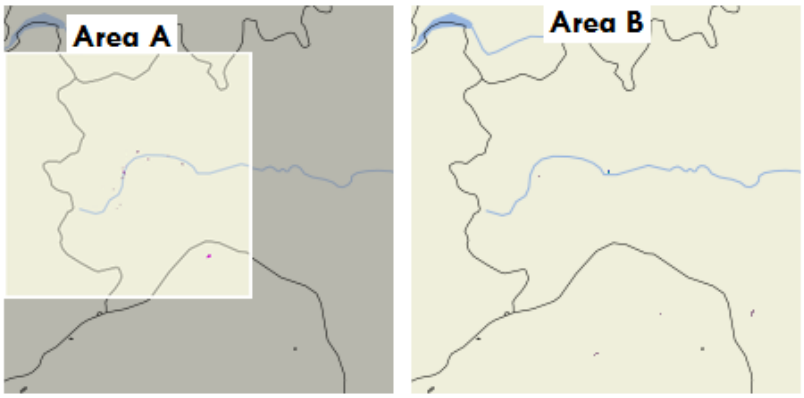


FIGURA 6.9: **Area geografica B.** Nelle due immagini viene mostrata l'*Area A* (figura di sinistra) in contrapposizione all'*Area B* (figura di destra), notevolmente più ampia rispetto alla prima.

di 288 immagini per ogni giornata intera di dati.

La *risoluzione spaziale*, invece, è più contenuta rispetto a quella associata agli eventi 1–38 sull'Area A. Se in quel caso era pari a 500.4 m, in questo caso, per mantenere una matrice 500 x 500 pur avendo allargato l'area geografica, risulta pari a 800 m, lato della singola *cella geografica*. Svolgendo ancora una volta il calcolo, l'Area B risulta essere un'area geografica di lato $L = 400$ km, coperta da 250 000 celle geografiche. Ulteriori dettagli sulle caratteristiche dell'Area B le si può trovare in TABELLA 6.8.

Per individuare geograficamente l'Area B, viene utilizzato ancora una volta il sistema di coordinate geografiche ED1950 UTM (si veda la nota[3]). Si sottolinea, inoltre, che il radar meteorologico coinvolto non è solamente quello di Bric della Croce come nel caso dell'*Area A*, bensì anche quello di Monte Settepani, dando vita a un eco radar *composito*. Tuttavia, non hanno sempre funzionato entrambi i radar, per cui può accadere d'imbattersi in qualche evento descritto solamente dagli echi di uno dei due.

Quest'ultima informazione è contenuta all'interno dell'*header* del file originale, con estensione *.cri*. Alla voce *radar*, infatti, è contenuto l'elenco delle scansioni impiegate nel mosaico, mentre per esempio alla voce *cartesian parameters* sono contenuti i dati di georeferenziazione, e alla voce *statistics* è fornito il numero di pixel che supera una certa soglia di [dBZ].

Oltre al file in formato originale, con estensione *.cri*, si dispone per ogni singola scansione del corrispondente file convertito in binario semplice, con estensione *.flt*, e di un file *header* con estensione *.hdr* contenente, nelle sue 7 righe, le sole informazioni di georeferenziazione. É il file FLT che

	AREA B
Lato	400 km
Radar	Bric della Croce Monte Settepani
Numero di pixel	500 x 500
Risoluzione spaziale (Δx)	800 m
Risoluzione temporale (Δt)	5 min 10 min
Datum geodetico	ED1950
Sistema di proiezione	UTM
$\mathbf{x_{LL}}$	274 235 m
$\mathbf{y_{LL}}$	4 763 898 m

TABELLA 6.8: **Caratteristiche dell'Area B.** In tabella sono elencate le principali caratteristiche che contraddistinguono l'*Area B*, alcune in comune con quelle relative all'*Area A*, altre differenti. In particolare, si nota che il sistema di coordinate descrivente le celle geografiche è il medesimo, mentre una importante differenza è, oltre alla quella relativa al lato della singola cella spaziale, il coinvolgimento non solo del radar di Bric della Croce, ma anche di quello di Monte Settepani.

si è utilizzato per ottenere, dopo la sua apertura e lettura condotta in MATLAB, la matrice di riflettività associata a ogni singola scansione.

In TABELLA 6.9 vengono riassunte le principali caratteristiche associate alle due aree, A e B.

6.4.4 La classificazione degli eventi

Nelle tabelle precedenti, riportanti l'elenco degli eventi a disposizione, veniva fornito anche un *carattere* associato all'evento: *stratiforme* oppure *convettivo*. Sottolineando che si tratta di un carattere *medio*, in quanto può capitare di rinvenire attività convettiva per qualche ora, e attività stratiforme per il restante tempo, in questo paragrafo si delineano brevemente gli indicatori utilizzati per la determinazione della tipologia di fenomeno piovoso contenuto negli 81 eventi a disposizione.

Nell'ambito del suo studio di dottorato, Alfieri [1] utilizza dati in quota provenienti da radiosonde (ad esempio variabili meteorologiche come pressione, temperatura e umidità relativa), dati di superficie come l'umidità al

	n. eventi	n. giorni	Anni	Δt	Δx
Area A	38	62	2003–2007	10 min	500.4 m
Area B	43	53	2008–2020	5 min 10 min	800 m

TABELLA 6.9: **Gli eventi all'interno delle aree A e B.** In tabella sono riportare le principali differenze tra le due aree, oltre che il numero di giorni e di eventi associati a ciascuna delle due.

suolo, e indici di instabilità atmosferica per determinare se un fenomeno di precipitazione sia a carattere *convettivo* oppure *stratiforme*. É specificatamente l'*umidità al suolo* a determinare la presenza di *convettività*.

Libertino [61], dal canto suo, dispone di informazioni pluviometriche, e analizza i massimi di precipitazione cumulata misurati su diversi intervalli temporali (10 min, 30 min, 1 h, 3 h ecc.). La presenza di massimi in intervalli temporali ridotti è segno di convettività.

Non disponendo di questa tipologia di dati, ma beneficiando della sola informazione di riflettivià contenuta nelle scansioni radar, si è seguita la tipologia di analisi condotta da Picco [87]. Per ogni singola giornata di ogni singolo evento precipitativo si è graficato l'andamento, nell'arco delle 24 h, di alcune quantità relazionate alla *riflettività*:

1 – in primo luogo, si è tenuta traccia del massimo di riflettività rinvenuto in ciascuna scansione, ottenendone il modificarsi nel tempo;

2 – in secondo luogo, si è graficato l'andamento della percentuale di area dell'intera scansione radar riportante valori di riflettività oltre le seguenti soglie:

- 0 dBZ, definente (in modo arbitrario) l'*area colpita*
- 20 dBZ, definente la presenza di pioggia almeno *molto lieve*
- 25 dBZ, definente la presenza di pioggia almeno *lieve*
- 35 dBZ, definente la presenza di pioggia almeno *moderata*

3 – in terzo luogo, si è graficato un altro andamento di area percentuale, ma relativo non all'intera scansione, bensì all'*area colpita* dall'evento (chiamata nel seguito anche *area interessata* e arbitrariamente individuata come l'area con associata una riflettività positiva $Z > 0$), con soglie in parte differenti:

- 25 dBZ, definente la presenza di pioggia almeno *lieve*
- 35 dBZ, definente la presenza di pioggia almeno *moderata*
- 42 dBZ, definente la presenza di pioggia almeno *forte*

Dopo aver analizzato tutte le oltre 23 000 scansioni radar mediante algoritmi sviluppati in linguaggio Python, a ciascuna delle 115 giornate di dati risultano associati i tre grafici sopra descritti.

Sulla base di questi è possibile determinare quale sia il carattere prevalente dei fenomeni piovosi contenuti negli 81 eventi a disposizione. Sottolineando che non esiste una regola per affermare in modo univoco la convettività o meno di un certo evento precipitativo, si forniscono, a titolo d'esempio, i grafici relativi a due eventi con carattere opposto: in FIGURA 6.10 viene analizzato un giorno prevalentemente *convettivo*, relativo all'evento numero 39, il primo evento descritto sull'*Area B*, abbattutosi nella giornata del 29 Maggio 2008, mentre in FIGURA 6.11 ne viene riportato uno prevalentemente *stratiforme*, relativo alla giornata del 24 Novembre 2019 e appartenente all'evento numero 78, anch'esso descritto sull'*Area B*.

Si lascia alle didascalie al di sotto di ciascuna FIGURA il commento dei grafici, ma si sottolinea che saranno mostrati solamente due dei tre grafici descritti in questo paragrafo, in quanto il terzo, quello relativo ai massimi di riflettività, è risultato piuttosto superfluo e, spesso, ingannevole. Ci si è perciò basati unicamente sui restanti due, traccianti l'andamento di aree percentuali ospitanti pixel con riflettività oltre certe soglie.

6.5 La scelta della regione

Definiti gli 81 eventi precipitativi a disposizione, per un totale di 115 giorni di osservazioni, si è davanti a quello che, potenzialmente, può costituire l'*archivio storico* per la ricerca degli analoghi. Precisamente, considerando che quasi tutti i 115 giorni di osservazione contengono 24 h di dati (eccetto per qualche ora mancante in 5 di queste giornate, e per qualche isolata scansione indisponibile), e considerando che:

→ 68 di questi giorni contengono osservazioni ogni 10 minuti, corrispondenti a 144 osservazioni giornaliere, e

→ i restanti 47 giorni contengono osservazioni ogni 5 minuti, corrispondenti a 288 osservazioni giornaliere,

allora, assumendo 24 h piene di dati per ciascun giorno, un calcolo approssimativo conduce al numero di scansioni totali a disposizione: $\sim$ **23 300**.

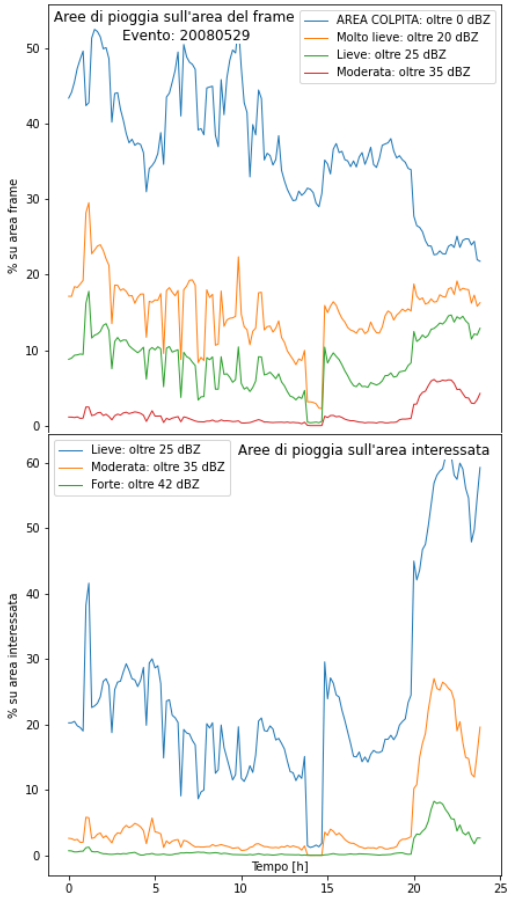


FIGURA 6.10: **Esempio di evento a carattere convettivo.** In figura si riportano due grafici relativi all'evento del 29 Maggio 2008. Nel grafico in alto, relativo ad aree calcolate rispetto all'intera *Area B* su cui l'evento è descritto, si nota circa un 40% di area con riflettività positiva, valore poi calante. Di quest'area, circa la metà vede pioggia almeno *molto lieve*, che diventa *lieve* su un'area ulteriormente dimezzata. Quanto alla pioggia *moderata*, primo possibile sintomo di *convezione*, questa è quasi assente all'inizio e per buona parte della giornata, ma si attesta fin quasi all'8% dell'intera *Area B* nelle ultime 4 ore dell'evento. É il comportamento contemporaneo delle 4 curve in quelle ultime 4 ore a profumare di *convezione*. Infatti, si assiste a una riduzione dell'area colpita, sino al 25% dell'intera *Area B*, e la particolarità consiste nell'estrema vicinanza tra le quattro curve. Ciò significa che il campo di riflettività si è ristretto (campi di pioggia estesi sono tipici di eventi *stratiformi*, mentre campi di pioggia più contenuti sono tipici di eventi *convettivi*), e al contempo si è intensificato. Poiché gli eventi convettivi sono proprio caratterizzati da campi ridotti nello spazio ma con alte intensità di pioggia, quest'evento sembra proprio potersi dire inizialmente a carattere prevalentemente *stratiforme*, ma sul finale decisamente *convettivo*. La conferma giunge dall'analisi del successivo grafico, che questa volta mostra aree relative alla zona con riflettività positiva. Si aggiunge la curva relativa alla pioggia *forte*, e anche quest'ultima mostra un picco che raggiunge quasi il 10% nelle ultime 4 ore della giornata.

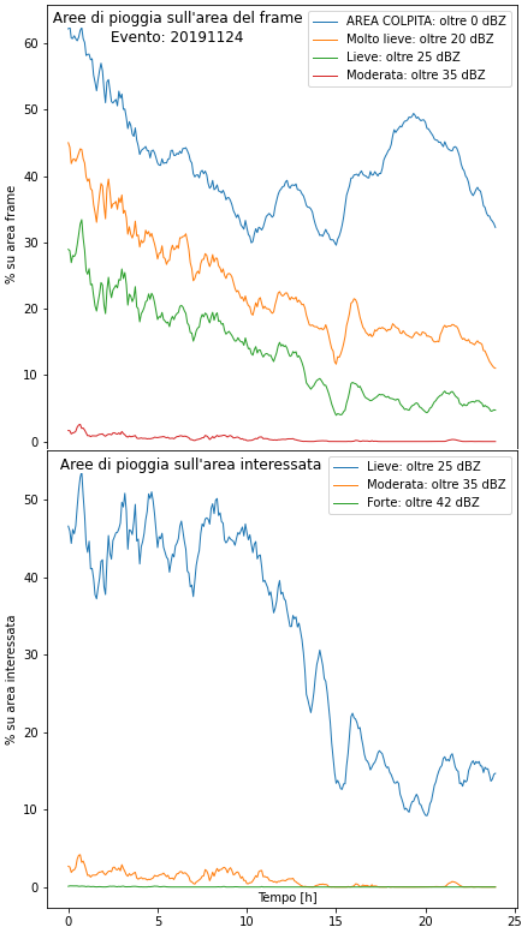


FIGURA 6.11: **Esempio di evento a carattere stratiforme.** In figura vengono mostrati due dei tre grafici relativi all'evento del 24 Novembre 2019. Già dal grafico in alto è evidente la differenza rispetto al caso in FIGURA 6.10: la traccia rossa, relativa alla pioggia *moderata*, rasenta lo zero, non presentando nessun tipo d'innalzamento verso valori degni di nota. Invece, c'è grande presenza di pioggia *lieve*, coprente gran parte dell'area colpita, e quest'ultima, come può notarsi, è notevolmente estesa. La pochissima presenza di pioggia almeno *moderata* e l'ampia occupazione dell'*Area B* da parte del campo piovoso odorano di evento *stratiforme*. La conferma giunge ancora una volta dal secondo grafico, quello sottostante, che evidenzia come quasi il 50% dell'area colpita sia caratterizzata da pioggia almeno *lieve*, ma solamente una piccolissima parte di questa costituisca pioggia *moderata*. Non c'è traccia, invece, di pioggia *forte*, per cui può concludersi che si tratta di un evento piovoso di tipo *stratiforme* la cui estensione e la cui intensità, nella seconda metà di giornata, calano ulteriormente.

Questo è all'incirca il numero di scansioni radar da analizzare se si vuole condurre una previsione per analoghi basata su un archivio contenente tutti gli 81 eventi.

E questo è stato il proposito iniziale di questo studio: utilizzare tutte le osservazioni disponibili, nessuna esclusa, in modo tale da rendere il più ampio possibile l'archivio storico, e di conseguenza aumentare le probabilità di trovare *buoni* analoghi.

6.5.1 L'upscaling degli eventi

La prima problematica che si riscontra, tuttavia, provando a perseguire questa via risiede nella differenza di *risoluzione spaziale* dei dati radar. Infatti, i dati associati all'*Area A* sono maggiormente risoluti, descrivendo con maggiore dettaglio il campo di riflettività con celle di lato 500.4 m, mentre invece i dati associati all'*Area B* contengono, con le loro celle di lato 800 m, un livello di dettaglio inferiore.

Questa differenza di *risoluzione spaziale* genera un problema di *confrontabilità* tra scansioni appartenenti alle due aree. Infatti, una cella di lato 800 m appartenente a una scansione dell'*Area B*, ad esempio, non è confrontabile con un'altra cella di lato 500.4 m appartenente all'*Area A*, in quanto non si avrebbe corrispondenza geografica.

Il metodo che si è utilizzato per risolvere questa problematica, e rendere confrontabili scansioni appartenente ad *Area A* e *Area B*, è stato il cosiddetto *upscaling* delle scansioni a più alta risoluzione, quelle dell'*Area A*, verso il livello di risoluzione di quelle dell'*Area B*. Questo processo riduce la risoluzione delle scansioni sostituendo le celle geografiche elementari con celle più grandi. Da un altro punto di vista, poiché la scansione radar può rappresentarsi graficamente con una matrice bidimensionale di pixel formanti un'immagine, la cella geografica elementare corrisponde a un pixel, e di conseguenza la procedura di *upscaling* sostituisce ciascun pixel con uno più grande.

Malgrado esistano tool che permettono di effettuare l'*upscaling* di un'immagine con grande rapidità, si è provato a implementarlo mediante qualche riga di codice in linguaggio Python. L'idea seguita è stata la seguente: suddividere ogni singola cella dell'*Area A*, che qui indichiamo come *cella-madre*, con lato di 500.4 m, in tante *sotto-celle* definite da un grigliato regolare, con associato a ciascuna di queste il valore di riflettività della *cella-madre*. Dopo questa prima procedura di *upscaling*, la *cella-madre* dell'*Area B* viene costruita unendo sotto-celle dell'*Area A*, e il valore di ri-

flettività associato coinciderà con la media dei valori di riflettività portati dalle sotto-celle comprese.

Nel dettaglio, le operazioni seguite per l'*upscaling* delle scansioni dell'*Area A* sono le seguenti:

1. **Creazione del grigliato 2500 x 2500 per il downscaling:** ognuno dei 250 000 (500 x 500) pixel della scansione A viene suddiviso in 25 *sotto-pixel* (5 x 5), ottenendo una matrice di *sotto-pixel* 2500 x 2500, costituente un grigliato notevolmente più fitto del precedente;

2. **Downscaling della scansione dell'Area A:** poiché il lato corrispondente al pixel era 500.4 m, commettendo un trascurabile errore si approssima a 100 m il lato corrispondente a ciascun *sotto-pixel*. Il valore di riflettività associato a ciascuno di essi è pari a quello del pixel-madre da cui derivano;

3. **Creazione del grigliato 312 x 312 per l'upscaling:** poiché l'unione di 8 x 8 *sotto-pixel* produce un pixel di lato 800 m, quest'operazione permette di ottenere la cella geografica dell'*Area B*. Si suddivide, perciò, il grigliato di *sotto-pixel* di dimensioni 2500 x 2500 in un grigliato meno fitto, 312 x 312, costituito da aree quadrate portanti 64 (8 x 8) *sotto-pixel* ciascuna;

4. **Upscaling della scansione dell'Area A:** assegnando a ciascun pixel del nuovo grigliato un valore di riflettività pari alla media dei valori di riflettività associati ai 64 *sotto-pixel* in esso contenuti, si è compiuto l'upscaling della scansione A, ottenendo una matrice 312 x 312 con celle geografiche di lato 800 m.

In FIGURA 6.12 viene schematicamente mostrata l'idea associata alla procedura appena descritta.

Le difficoltà incontrate nell'applicazione di questo algoritmo in linguaggio Python si legano alla gestione di matrici che, a seguito della procedura iniziale di *downscaling*, raggiungono una dimensione notevole, 2 500 x 2 500, producendo difficoltà legate al costo computazionale e alla memorizzazione. Tuttavia, lasciando all'elaboratore elettronico il tempo di cui necessitava, si è riusciti a ultimare la procedura di *downscaling* senza particolari difficoltà.

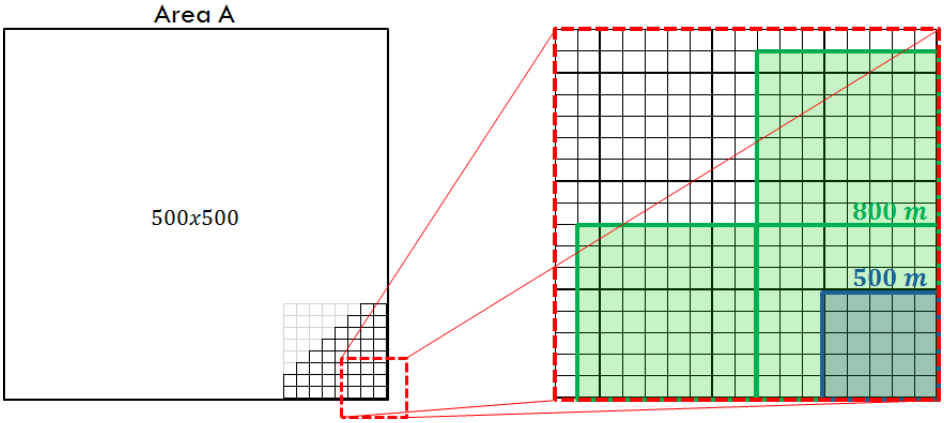


FIGURA 6.12: **Procedura di upscaling.** Le due figure soprastanti illustrano schematicamente la procedura di *upscaling*. A sinistra, una generica scansione appartenente all'*Area A*, contenente 500 x 500 pixel, alcuni dei quali sono tracciati nell'angolo in basso a destra della scansione. Focalizzando l'attenzione sull'area contornata con la tratteggiatura rossa, mostrante per intero 9 di questi pixel, nell'immagine di destra la si dettaglia, mostrando la suddivisione di ciascuno di questi (a titolo d'esempio ne viene evidenziato in blu solamente uno) in 5 x 5 sotto-pixel. L'unione di 8 x 8 sotto-pixel definisce i riquadri verdi, costituenti i nuovi pixel derivanti dalla procedura di upscaling.

6.5.2 I criteri della scelta

Condotto l'*upscaling*, il problema della confrontabilità degli eventi che si verificano sull'*Area A* e sull'*Area B* è risolto. A questo punto, tutti gli 81 eventi precipitativi risultano potenzialmente utilizzabili per la creazione dell'archivio di eventi storici.

La questione successiva, allora, diventa la *scelta della regione* geografica d'indagine, sulla quale condurre le previsioni. Due sono stati gli iniziali criteri che hanno guidato questa scelta:

1° **CRITERIO: Uso del maggior numero di eventi possibile.** La differente copertura geografica dell'*Area A* e dell'*Area B* potrebbe rendere alcuni eventi inutilizzabili nel caso in cui la regione scelta superi i confini di una delle due aree (nello specifico dell'*Area A*, in quanto contenuta nell'*Area B*). Per questo motivo, perchè siano utilizzabili tutti gli 81 eventi a disposizione, occorre scegliere una regione interamente contenuta nell'*Area A*.

2° **CRITERIO: Regione prevalentemente montuosa.** Con l'intenzione già dichiarata d'indagare la predicibilità del *metodo degli*

analoghi su zone a orografia complessa, si rende necessario scegliere una regione d'analisi che coinvolga perlopiù una topografia montuosa.

Oltre a questi due, non si è menzionato l'ovvio vincolo di doversi trattare di una regione compresa interamente almeno in una delle due Aree, A oppure B, sottolineando che la comprensione in A comporta automaticamente la comprensione in B.

Perché possa essere soddisfatto il secondo criterio, occorre analizzare la disposizione delle catene montuose all'interno della regione piemontese e nei suoi dintorni. A tal proposito, in FIGURA 6.13 si riporta una resa dell'orografia all'interno delle regioni Piemonte e Val d'Aosta.

6.5.3 La prima regione scelta

Sulla scorta dei criteri appena definiti, si è così proceduto all'individuazione della regione mostrata in FIGURA 6.14. Come descritto all'interno della didascalia associata, si è scelto d'inquadrare una zona contenuta tanto nell'*Area B* quanto nell'*Area A* per poter utilizzare tutti gli eventi disponibili. Inoltre, si è scelta una regione leggermente più ridotta rispetto all'estensione dell'*Area A*, posizionata in basso a sinistra rispetto ad essa, centrando così maggiormente la catena alpina. Entrambi i criteri risultano così assecondati.

L'archivio di eventi storici, perciò, consta di 81 eventi, tutti con celle geografiche di lato 800 m: da un lato i 38 eventi definiti sull'*Area A* a cui si è applicata la procedura di *upscaling*, dall'altro lato i 43 eventi definiti sull'*Area B*. In questi termini, la regione scelta contiene 240 x 240 celle geografiche di lato 800 m, ciascuna corrispondente a un pixel.

Una problematica, tuttavia, si palesa una volta condotta la ricerca per analoghi su tale regione. Infatti, anticipando un risultato per generare il quale si utilizzerà la metodologia descritta all'interno del prossimo capitolo, la limitatezza dell'area di scansione relativa al radar Bric della Croce rende non completamente coperta l'*Area A*, costituita da un quadrato che circoscrive proprio l'area circolare di scansione. E poiché la regione scelta interseca l'area di scansione senza essere totalmente contenuta al suo interno (si veda nuovamente la FIGURA 6.14), si potrebbe incappare in analoghi *tagliati* in corrispondenza della fine dell'area di scansione del radar Bric.

In FIGURA 6.15 viene mostrato anticipatamente un risultato della ricerca per analoghi condotta su questa prima regione. Si è scelto l'evento 68, relativo al giorno 11 Aprile 2018, evento descritto sull'*Area B*, e si è condotta una ricerca di analoghi alla scansione delle 17:30, corrispondente

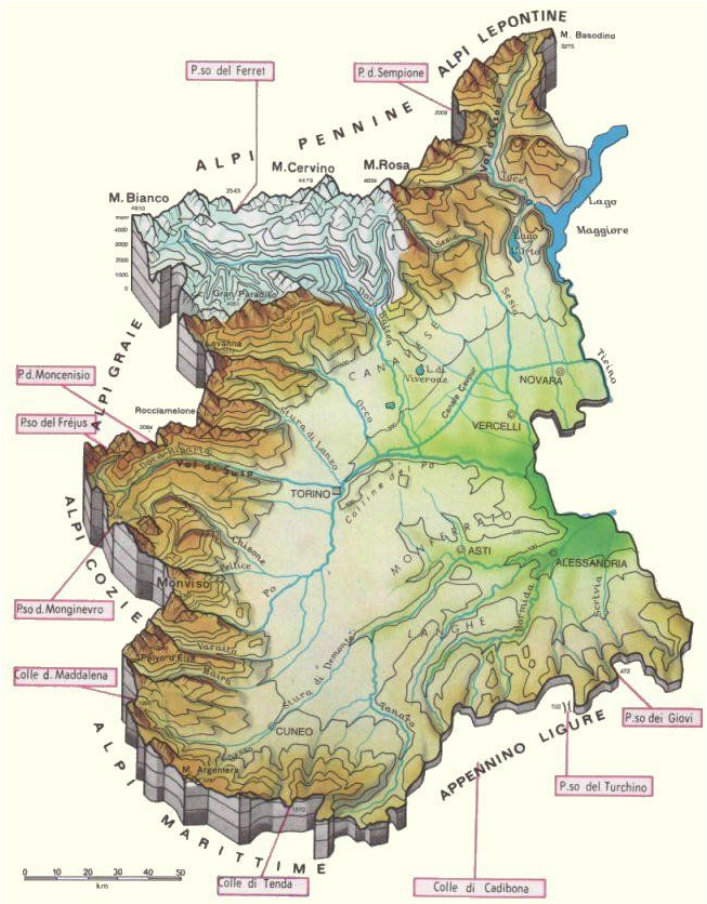


FIGURA 6.13: **Orografia della regione Piemonte.** All'interno della cartina fisica soprastante, contraddistinta da una certa resa tridimensionale dei rilievi, viene mostrata qualitativamente l'orografia delle regioni Piemonte e Val d'Aosta. Si nota come la regione piemontese sia circondata da catene montuose su tre dei quattro lati (sui settori Nord e Ovest si elevano i rilievi Alpini, sul settore Sud quelli Appenninici) lasciando libera la vista solamente sul settore orientale, che sfocia nella Pianura Padana.

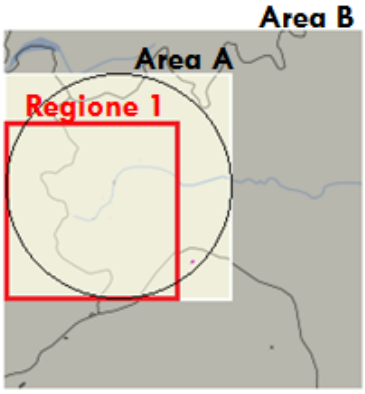


FIGURA 6.14: **La prima regione scelta.** In figura, racchiusa da un quadrato rosso, viene mostrata la prima regione scelta per le analisi. Compresa all'interno dell'*Area A* e, di conseguenza, anche all'interno dell'*Area B*, questa regione permette di utilizzare tutti gli 81 eventi piovosi. La sottile circonferenza centrata nell'*Area A*, tuttavia, definisce il confine della scansione del radar Bric della Croce, rendendo scoperte alcune aree, specialmente quella a sud-ovest della regione.

al *frame* 211 sui 288 di quella giornata. La ricerca di analoghi all'interno del database di $\sim 23\,000$ scansioni (ricerca sulle cui modalità si dettaglierà nel capitolo successivo) ha prodotto, come primi sei analoghi, le scansioni riportate in piccolo in FIGURA 6.15. Si tratta in tutti e sei i casi di scansioni appartenenti all'*Area A*, come s'intuisce dal taglio circolare nella zona bassa dei sei echi radar.

Poiché, come nel caso mostrato nell'esempio, la limitata copertura associata all'*Area A* renderebbe *parziale* l'analogia, questa prima regione viene abbandonata, lasciando al paragrafo successivo l'onere d'individuare una nuova regione che non presenti questa problematica.

6.5.4 La seconda regione scelta

Perché non si ripresenti la problematica della prima regione, è sufficiente scegliere una seconda regione che si esaurisca completamente all'interno dell'area circolare di scansione del radar Bric della Croce. Si può, così, aggiungere un terzo criterio ai due già delineati nel precedente paragrafo *I criteri della scelta*:

3° **CRITERIO: Giacenza nell'area di scansione del radar Bric.** Soddisfare questo criterio garantirebbe la copertura completa della regione tanto da parte delle scansioni sull'*Area B* quanto da parte di quelle sull'*Area A*.

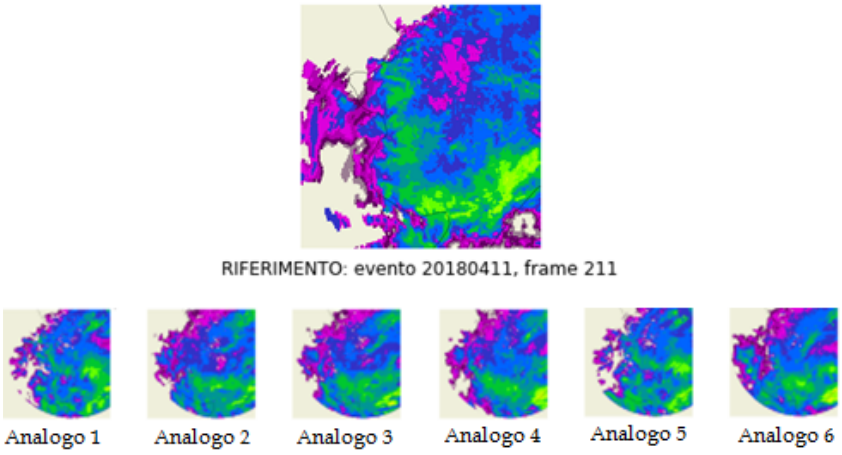


FIGURA 6.15: **Esempio di ricerca per analoghi sulla prima regione.** In alto, la scansione delle 17:30 relativa all'evento numero 68 fa da riferimento per la ricerca di scansioni ad essa analoghe. In basso, il risultato della ricerca secondo le metodologie descritte nel prossimo capitolo. Le sei scansioni maggiormente analoghe sono tutte relative all'*Area A*, e perciò tagliate nella parte bassa, mentre la scansione di riferimento si riferisce all'*Area B*, e dunque non lo è.

E dunque, seguendo questo proposito, la regione oggetto della seconda scelta è quella mostrata in FIGURA 6.16. Con questa scelta sono contemporaneamente soddisfatti tutti e 3 i criteri definiti, perdendo tuttavia in estensione della regione. Infatti, perché quest'ultima resti comunque centrata su zone montuose, viene a rimpicciolirsi notevolmente.

Rispetto alla prima regione, composta da 240 x 240 celle geografiche, in questo caso si è di fronte a un grigliato 144 x 144, con lato di ciascuna cella geografica ancora una volta di 800 m sfruttando l'*upscaling* degli eventi sull'*Area A*.

Superata la problematica relativa al raggio di visibilità del radar Bric, non paiono esserci particolari problematiche relative a questa seconda regione. Si tratta, tuttavia, di un'area di previsione particolarmente limitata, che non rende omaggio alle ampie scansioni relative all'*Area B*.

É per questo che, con la motivazione ulteriore d'indagare la qualità della previsione al variare della dimensione della regione analizzata, si è pensato d'individuare una terza regione.

6.5.5 La terza regione scelta

Perché fossero ampiamente sfruttati gli echi radar osservati sull'*Area B*, occorreva liberarsi delle osservazioni sull'*Area A*. Difatti, qualsiasi ridefi-

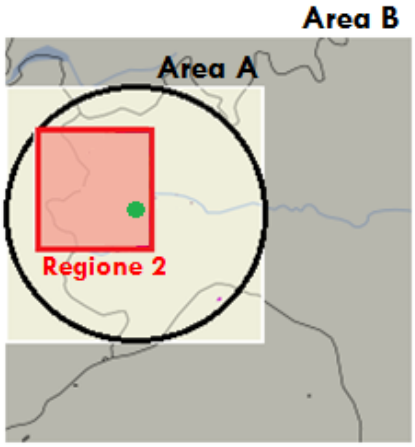


FIGURA 6.16: **La seconda regione scelta.** In figura viene mostrata, riquadrata in rosso, la regione oggetto della seconda scelta. Si tratta di una regione più ridotta rispetto alla prima, ma la totale inclusione all'interno dell'area di scansione del radar Bric della Croce (individuato dal punto verde) rende ugualmente affidabili gli analoghi individuati sulle *Aree A e B*, senza il presentarsi di zone *tagliate*.

nizione della regione d'analisi che volesse rispettare i tre criteri elencati, mantenendosi quadrata, non poteva essere molto più estesa della regione individuata nella seconda scelta, se non rendendo molto ridotta la zona a orografia complessa.

Nella ferma inderogabilità al **2° CRITERIO** riguardante le aree montuose e al **3° CRITERIO** concernente l'omogeneità di copertura da parte delle osservazioni formanti l'archivio storico, si è reso necessario agire sul **1° CRITERIO**.

Si è così deciso d'individuare una terza regione d'analisi all'interno della sola *Area B*, permettendole d'estendersi oltre la copertura del radar Bric e, in generale, oltre l'*Area A*. Questa regione, mostrata in FIGURA 6.17, consta di 288 x 288 celle geografiche, ciascuna di lato 800 m, risultando perciò di estensione quadrupla rispetto alla regione oggetto della seconda scelta.

Non giacente all'interno dell'*Area A*, per la ricerca degli analoghi relativi a osservazioni su questa regione possono utilizzarsi solamente i 43 eventi definiti sull'*Area B*. Questo dimezza circa la profondità del database di eventi storici, ma sarà utile per dedurre qualcosa sulla dipendenza della predicibilità associata al metodo per analoghi dalla profondità del database adottato.

Altre possibili scelte della regione oggetto della previsione possono ri-

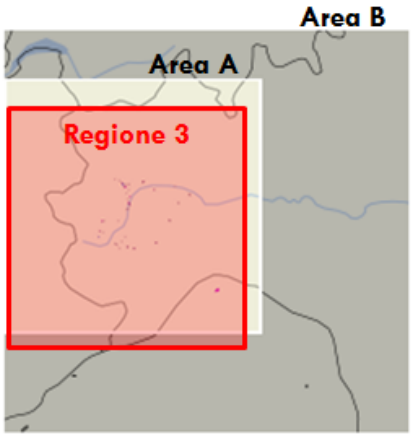


FIGURA 6.17: **La terza regione scelta.** Nella figura soprastante è presentata, riquadrata in rosso, la regione derivante della terza scelta. Come può vedersi a occhio, si tratta di una regione ampia quasi quanto l'intera *Area A*, ma non racchiusa né all'interno dell'area di visibilità del radar Bric della Croce, né all'interno della stessa *Area A*. La catena alpina su cui è centrata è quella occidentale, nel settore Ovest della regione Piemonte, ma racchiude anche una buona parte della catena appenninica meridionale.

cadere su piccole aree centrate sul radar Bric della Croce, seguendo la filosofia della seconda scelta, perdendo però gran parte della complessità orografica, oppure su aree ampie che seguano le orme della terza regione, ma dislocate su zone montuose differenti come, ad esempio, sul settore alpino settentrionale invece che sull'occidentale.

Capitolo 7

NACO – Il metodo

7.1 Introduzione al capitolo

Presentata, all'interno del capitolo precedente, la tipologia di osservazioni a disposizione ed elencati gli eventi precipitativi raccolti, in questo capitolo si descriverà la metodologia di previsione per analoghi che fonda il sistema sviluppato in questo studio di tesi, il NACO.

Dopo una rapida schematizzazione delle tre fasi in cui si articola l'applicazione del metodo NACO, all'interno della sezione intitolata *Fase 1 – La scelta della query* si descriveranno vincoli e criteri per la selezione della scansione radar facente le veci dell'osservazione in tempo reale, nella sezione intitolata *Fase 2 – La ricerca degli analoghi* si andrà ad analizzare il cuore della metodologia, e infine all'interno della sezione con titolo *Fase 3 – Il confezionamento della previsione* si dirà come produrre una previsione di nowcasting a partire dalle scansioni maggiormente analoghe.

Per lo sviluppo di questo capitolo si è specialmente attinto dallo studio alla base del sistema NORA [84], già ripetutamente citato, e dalla pubblicazione di Foresti *et al.* intitolata *Retrieval of analogue radar images for ensemble nowcasting of orographic rainfall* [32].

7.2 Le tre fasi del metodo

Come già diffusamente sottolineato nei capitoli precedenti, e come l'acronimo inequivocabilmente suggerisce, il sistema NACO (*Nowcasting by Analogues over Complex Orography*) rappresenta una metodologia di previsione a brevissimo termine fondata sul metodo degli analoghi, e destinata all'anticipo della precipitazione su orografia complessa.

Per fornire, come primissimo approccio al metodo NACO, una estrema schematizzazione della logica che lo sostiene – logica comune a pressoché tutti i metodi basati sugli analoghi –, si definiscono le tre macro-fasi che scandiscono il metodo:

Fase 1 – Scelta di una query. Si seleziona una scansione a caso tra le $\sim 23\,300$ scansioni a disposizione, lei costituirà la *scansione di riferimento* per la ricerca di scansioni a essa analoghe. Introducendo un termine inglese spesso utilizzato nella letteratura scientifica sugli analoghi [79], si chiama questa scansione *query*, in italiano *interrogazione*, quella che il frame di riferimento fa all'archivio alla ricerca di scansioni a lei analoghe;

Fase 2 – Ricerca delle situazioni più analoghe. All'interno del database di eventi storici viene condotta la ricerca delle scansioni radar più simili alla *query* e all'andamento dell'evento in un piccolo intorno della *query*;

Fase 3 – Previsione basata sul futuro degli analoghi. Individuate le situazioni maggiormente analoghe, il futuro ad esse associato costituisce la previsione per la *query*.

Se da un lato la **Fase 1** e la **Fase 3** sono piuttosto esplicative, e perciò non hanno quasi bisogno di ulteriori dettagli, la **Fase 2**, al contrario, racchiude il cuore pulsante del *metodo degli analoghi*, caratterizzandolo e così distinguendo l'uno dall'altro metodo. Nel resto del capitolo, perciò, si procederà principalmente alla presentazione di tutte le operazioni contenute all'interno della Fase 2, colei che definirà secondo quali modalità verrà condotta la ricerca di situazioni analoghe, lasciando poche righe all'approfondimento della Fase 1 e della Fase 3.

7.3 Fase 1 – La scelta della query

7.3.1 I vincoli della scelta

Questa primissima fase consiste semplicemente nell'individuazione – piuttosto arbitraria – di una scansione radar che costituisca l'osservazione di riferimento per la ricerca degli analoghi. Se, nella realtà operativa del metodo, questa fase non esiste, in quanto è l'osservazione radar in tempo reale a costituire la *query*, per gli studi teorici sulla predicibilità del metodo occorre invece introdurla.

La *query* individuata stocasticamente all'interno dell'archivio di osservazioni radar fa, quindi, le veci dell'osservazione radar ottenuta real-time dal *forecaster* (oppure *nowcaster*, se si vuole sottolineare il brevissimo termine associato alle previsioni che il *previsore* intende fornire) addetto al compito della previsione meteorologica.

Non esiste un criterio per la selezione della *query*, in quanto nella realtà non c'è possibilità di scegliere quale osservazione di riferimento usare: dipende dal giorno e dall'orario per cui s'intende sviluppare una previsione sul futuro (e tipicamente, a livello operativo, ciò viene fatto di continuo, ad esempio ogni 10 minuti si genera una nuova previsione per le successive 6 ore).

Tuttavia, a seconda della regione d'indagine scelta (si veda la sezione intitolata *La scelta della regione* all'interno del capitolo precedente *NACO – I dati radar*), la *query* sarà individuata su un'area geografica piuttosto che su un'altra. In più, poiché non tutte le scansioni dell'archivio radar a disposizione presentano un fitto pattern di riflettività proprio in corrispondenza dell'orografia complessa, come *query* si tenderà a scegliere una scansione con su definito un ampio campo di riflettività, possibilmente centrato al di sopra delle aree montuose.

Non solo: esistono dei vincoli puramente pratici che limitano leggermente la libertà di scelta della *query*. Infatti, benché all'inizio di questa sezione si sia parlato di *scelta stocastica*, la *query* non può essere scelta totalmente a caso dall'archivio: occorre garantire che esistano almeno 2 h di osservazioni radar subito successive alla *query* stessa, in modo tale da poter poi confrontare le previsioni che verranno fatte, con le osservazioni. Ciò non permette di scegliere come *query* scansioni all'interno delle due ore conclusive di un certo evento.

7.3.2 Le limitazioni sull'archivio

Una volta scelta la scansione che farà da *query*, l'archivio radar viene privato delle scansioni contenute nell'intervallo temporale centrato sulla *query* e ampio 24 ore: 12 che anticipano la *query*, e 12 che la seguono. Il motivo di ciò si deve alla correlazione che esisterebbe tra eventuali analoghi individuati all'interno di questo intervallo e la *query* stessa. Nei casi di *query* appartenente a un evento costituito da sole 24 h di scansioni, viene eliminato l'intero evento dall'archivio radar.

Inoltre, perché possa confezionarsi una previsione a due ore (orizzonte temporale a cui si punterà), è necessario rimuovere, dalle scansioni contenute nell'archivio da analizzare, quelle entro le due ore che concludono un

certo evento, perché l'individuazione di un analogo all'interno di quell'intervallo temporale non permetterebbe di disporre di sufficienti osservazioni radar a esso successive, con le quali produrre una previsione per analoghi.

Selezionato dunque un evento tra gli 81 eventi a disposizione (oppure meno di questa quantità se la regione d'indagine non consente l'utilizzo dell'intero archivio), e selezionata una specifica scansione radar appartenente all'evento, quest'ultima costituirà la *query*. La **Fase 1** potrà così considerarsi conclusa.

7.4 Fase 2 – La ricerca degli analoghi

7.4.1 I requisiti

Con la **Fase 2**, il metodo prende forma e acquisisce carattere, distinguendosi dagli altri metodi per analoghi già esistenti. Difatti, la ricerca degli analoghi alla *query* può essere condotta seguendo svariate filosofie e individuando differenti criteri di somiglianza che sanciscano *quanto* una certa scansione sia simile alla query.

Possono dirsi però due i requisiti che deve possedere un criterio di ricerca degli analoghi perché possa dirsi un *buon* criterio:

Uno – deve guardare alla somiglianza dei pattern;
Due – deve guardare alla somiglianza dell'evoluzione temporale.

Su queste due linee guida si fondano pressoché tutti i metodi di previsione meteorologica fondati sugli analoghi.

7.4.2 Le soluzioni in letteratura

Prima di caratterizzare la Fase 2 del sistema NACO, si guarda ad alcune soluzioni trovate in letteratura scientifica per operare la ricerca degli analoghi.

Come primo esempio, lo studio del 2008 di Diomede *et al.* [27] conduce una ricerca per analoghi con il fine di ottenere una misura dell'incertezza associata a modelli numerici a scala ridotta (i cosiddetti *modelli LAM*).

Pur utilizzando come osservazioni di partenza non delle scansioni radar, bensì delle osservazioni di variabili meteorologiche di altro tipo (ad esempio altezza geopotenziale, velocità veticale del vento e umidità specifica), è comunque interessante sottolineare quali siano stati i metodi per quantificare la similitudine e così definire l'analogia tra la situazione meteorologica

di *query* e quelle contenute nell'archivio di dati: da un lato il cosiddetto *s1 score*, dall'altro la *distanza euclidea*. Se quest'ultima è ben nota, e rappresenta la distanza geometrica tra due punti (individuanti certe condizioni) in uno spazio n-dimensionale, lo *score s1* è invece meno noto, e si basa su un rapporto concernente i gradienti di una certa variabile, osservati sia nel *query* che nell'osservazione di cui si vuole valutare l'analogia con il *query*.

Per valutare invece la somiglianza nell'evoluzione temporale, questo studio utilizza le osservazioni relative a molte ore precedenti al *query* per definire un andamento temporale delle variabili, da confrontare con gli andamenti delle osservazioni contenute nell'archivio.

Un secondo studio d'esempio, portato avanti da Panziera *et al.*, è quello associato al già citato sistema NORA [84]. Le qualità che, nell'ambito di questo studio, vengono confrontate tra *query* e *archivio* con il fine d'individuare i casi di maggiore similitudine e sulla base di questi produrre una previsione (sia deterministica che probabilistica) sono quelle variabili meteorologiche che si sono viste [83] avere, in presenza di *forcing orografico*, un forte legame con il campo di pioggia osservato: i *venti sulla mesoscala* (stimati tramite le misure condotte dai radar Doppler) e la *stabilità dell'aria* (misurata dalle stazioni osservative di superficie).

Queste variabili meteorologiche si relazionano al forcing orografico, perciò la loro somiglianza, anche qui individuata mediante il calcolo della *distanza Euclidea*, individua una potenziale similitudine nella componente orografica di pioggia. In più, oltre all'analogia fondata sulla somiglianza di caratteristiche fisiche, in NORA ci si è basati anche sulla somiglianza dei campi di pioggia osservati da radar: da un lato confrontando la frazione di area bagnata della scansione radar, dall'altro confrontando il valor medio d'intensità di pioggia.

Tuttavia, nello studio NORA non viene considerata minimamente l'evoluzione temporale della precipitazione nell'individuazione degli analoghi, mancando al secondo dei due requisiti per un *buon* metodo di analogia elencati al precedente paragrafo. Un successivo articolo di Foresti *et al.* [33], infatti, già nel 2011 generalizzava l'approccio del sistema NORA considerando intere sequenze di immagini radar per tener conto, al momento della ricerca di analoghi, dell'evoluzione temporale della precipitazione. Tramite l'uso della PCA (*Principal Component Analysis*), all'interno dello spazio degli autovalori vengono individuate traiettorie temporali simili, e sulla base della somiglianza di queste tra *query* e archivio si quantifica l'analogia

nell'evoluzione del fenomeno.

Nel 2012 Foresti *et al.* [34], facendo riferimento ancora una volta al sistema NORA, migliorano la componente di ricerca degli analoghi basata sulla somiglianza tra i campi di riflettività radar, considerando questa volta la specifica distribuzione spaziale del pattern, e non delle caratteristiche generali quali l'intensità di pioggia media e l'area bagnata, danti un'informazione globale sul campo di pioggia ma non consideranti la specifica distribuzione spaziale di questo.

Lo studio viene poi formalizzato l'anno dopo dai medesimi autori nell'articolo *Retrieval of analogue radar images for ensemble nowcasting of orographic rainfall* [32], operando il miglioramento relativo al riconoscimento della distribuzione spaziale per mezzo della *Principal Component Analysis*.

Infine, nel 2015, uno studio di Atencia e Zawadzki [5] individua gli analoghi seguendo una procedura fatta di tre step: nel primo step si guarda alla similitudine della distribuzione spaziale di riflettività (componente spaziale di ricerca dell'analogo), nel secondo step si passa al calcolo della correlazione temporale (componente temporale di ricerca dell'analogo), e infine nel terzo step si compara la situazione sinottica, confrontando tre variabili meteorologiche. Scremando il numero di analoghi a ogni step, si perviene all'individuazione degli analoghi *migliori*.

7.4.3 La procedura del NACO

Nell'ambito del sistema NACO sviluppato in questo studio di tesi, rispettando il requisito sulle due componenti di ricerca che, a nostro avviso, deve possedere una procedura d'estrazione di analoghi (si veda il paragrafo *I requisiti* all'interno di questa stessa sezione) perché possa considerarsi una *buona* procedura, l'individuazione degli analoghi è stata basata sull'applicazione sequenziale di due step di scandaglio. Il primo step fornisce il contributo di ricerca tenente conto della distribuzione spaziale del campo di pioggia, il secondo step quello tenente conto dell'andamento temporale del fenomeno.

L'applicazione del primo step individua i migliori analoghi fondati sulla somiglianza della distribuzione spaziale, e su questi analoghi viene applicato il secondo step, che screma ulteriormente il numero di scansioni analoghe sulla base della somiglianza dell'evoluzione del campo di pioggia nel tempo.

Trattandosi di due step di scrematura progressiva, nel seguito si parlerà di *cernita*, identificando i due step con 1^a *cernita* e 2^a *cernita*.

Si potrebbe pensare di applicare contemporaneamente entrambi i criteri di ricerca, definendo un unico *score* che quantifichi tanto l'analogia spaziale quanto quella temporale per ciascuna delle 23 000 scansioni a disposizione, ma, come si dettaglierà nelle prossime pagine, per motivi di costo computazionale associato alla ricerca basata sull'evoluzione temporale, ci si è limitati ad applicarla s'un numero limitato di scansioni, ridotto fortemente da una prima cernita.

Di seguito si dettagliano le operazioni sequenziali che definiscono la procedura di ricerca degli analoghi adottata dal metodo NACO:

0 – Scelta di una query. Si tratta di quella che è stata chiamata Fase 1, e descritta nella sezione precedente, ovvero quel momento di selezione di una *query* che anticipa la ricerca degli analoghi, oggetto della Fase 2;

1 – Valutazione dell'analogia spaziale. Si valuta la somiglianza tra la distribuzione spaziale di riflettività della scansione *query*, e quella di ciascuna delle circa 23 000 scansioni dell'archivio storico (se si stanno utilizzando tutte le scansioni a disposizione), per mezzo di due distinti criteri di somiglianza:

- *Criterio per aree.* Si fonda su uno spinto *upscaling* della *query* e dell'interno archivio, ottenendo macro-aree al posto di singoli pixel, e fondando la valutazione della somiglianza di distribuzione spaziale di riflettività sul confronto di macro-aree omologhe;
- *Criterio per pixel.* Si fonda sul semplice confronto dei singoli pixel omologhi tra *query* e scansioni dell'archivio storico;

2 – Riordino secondo l'analogia spaziale. Ottenuta, per ogni singola scansione dell'archivio, una misura della somiglianza di distribuzione spaziale di riflettività rispetto alla *query* basata su entrambi i criteri, si ordinano le scansioni dell'archivio per somiglianza crescente, ottenendo due distinte classifiche: una in base all'analogia di distribuzione spaziale valutata usando il *Criterio per aree*, l'altra usando il *Criterio per pixel*;

3 – Applicazione della 1ª CERNITA. Si prelevano le prime 30 scansioni da ciascuna delle due classifiche di somiglianza, escludendo

tutte le altre scansioni dell'archivio. Si dispone, così, di 30 scansioni analoghe spazialmente alla *query* secondo il *Criterio per aree*, e di altre 30 analoghe alla *query* secondo il *Criterio per pixel*;

4 – **Valutazione dell'analogia temporale.** Operando esclusivamente sulle 60 scansioni derivanti dalla 1^a *cernita*, rappresentanti le più simili alla *query* dal punto di vista della somiglianza di distribuzione spaziale di riflettività, si passa alla valutazione della somiglianza nell'evoluzione temporale del fenomeno precipitativo. Considerando che un'idea di come stia evolvendo l'eco radar possa aversi guardando al campo di moto istantaneo associato all'eco stesso, si valuta la somiglianza di evoluzione temporale secondo un'unica metodologia:

- *Criterio del campo di moto.* Si fonda sul confronto tra il campo di moto istantaneo associato alla *query* e quello associato alle scansioni sopravvissute alla prima cernita. Per motivi di costo computazionale, si utilizzerà un semplice *campo di moto uniforme*, e si valuterà la somiglianza di questo tra *query* e archivio ridotto valutando il *vettore differenza*;

5 – **Riordino secondo l'analogia temporale.** Ottenuta, per ogni singola scansione dell'archivio ridotto dalla prima cernita, una misura di somiglianza dell'evoluzione temporale dell'eco radar rispetto alla *query* basata sul *criterio del campo di moto*, si riarrangiano le 30 scansioni di ciascun archivio ridotto per somiglianza crescente, ottenendo nuovamente due distinte classifiche:

- *Classifica 1:* in cui le 30 scansioni più analoghe dal punto di vista della distribuzione spaziale secondo il *criterio per aree* sono state riarrangiate secondo il *criterio temporale del campo di moto*;
- *Classifica 2:* in cui le 30 scansioni più analoghe secondo il *criterio spaziale per pixel* hanno subìto il medesimo riarrangiamento secondo il *criterio del campo di moto*;

6 – **Applicazione della 2ª CERNITA.** Si prelevano le prime 10 scansioni da ciascuna delle due classifiche, rendendo inutili le restanti 20. Le scansioni selezionate con questa seconda cernita costituiscono quelle maggiormente analoghe alla *query*, individuate prima secondo la sola somiglianza spaziale, e solo in seconda battuta introducendo

la somiglianza nell'evoluzione temporale del fenomeno precipitativo.

Ed ecco che la **Fase 2**, relativa alla ricerca degli analoghi, è conclusa. Si è giunti ai 10 migliori analoghi secondo una certa sequenza di operazioni, e ad altri 10 migliori analoghi secondo una cert'altra sequenza di operazioni (l'unica differenza tra le due sequenze risiede nel criterio utilizzato per quantificare la somiglianza di distribuzione spaziale di riflettività).

Non resta che dettagliare alcuni aspetti qui sopra sommariamente descritti, quali i criteri per misurare la somiglianza, tanto spaziale quanto temporale, tra *query* e scansioni dell'archivio.

7.4.4 La somiglianza di distribuzione spaziale in NACO

S'inizia con il descrivere i criteri relativi alla 1^a *cernita*, quelli valutanti la somiglianza nella distribuzione spaziale tra *query* e scansioni dell'archivio. Prima di dettagliare i criteri *per aree* e *per pixel* citati nell'elenco di operazioni appena stilato, si cita brevemente un terzo criterio, non adottato dal NACO ma utilizzato dal sistema NORA [84].

7.4.4.1 Il criterio dell'area bagnata

Il criterio che da il titolo a questo paragrafo è stato adottato dal sistema NORA – stante per *Nowcasting of Orographic Rainfall by means of Analogues* [84] – come criterio per la quantificazione della somiglianza del pattern piovoso tra *query* e *archivio*.

L'idea, mostrata in FIGURA 7.1, è quella di valutare semplicemente la percentuale di area bagnata all'interno della scansione, e basare la somiglianza tra due scansioni su questo valore. In NORA questo indice di somiglianza viene chiamato WAR, *Wet Area Ratio*, ed è uno dei due criteri (assieme all'IMF, *Image Mean Flux*, corrispondente al valor medio d'intensità di pioggia) su cui si fonda la componente di selezione degli analoghi condotta guardando al campo di riflettività radar.

Tuttavia, come descritto nella didascalia associata alla FIGURA 7.1, il criterio WAR (come anche il criterio IMF) non riesce ad essere sensibile alla specifica distribuzione spaziale in due dimensioni del campo di riflettività, fornendo valori identici di WAR (oppure di IMF) anche per scansioni completamente differenti. Questa debolezza, infatti, ha portato, da parte di studi immediatamente successivi, allo sviluppo di criteri che tenessero in considerazione la specifica distribuzione spaziale [34] [32].

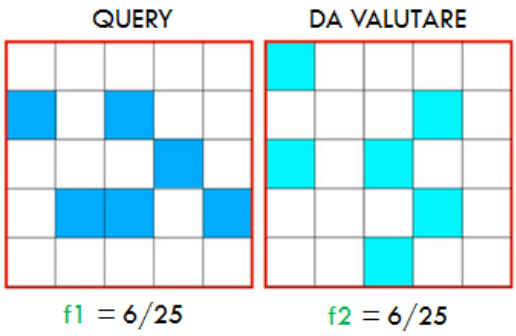


FIGURA 7.1: **Rappresentazione del WAR.** Nelle due figure soprastanti viene mostrato schematicamente come funziona il criterio del *Wet Area Ratio*. Si valuta la frazione di pixel contraddistinti da pioggia tanto nel *query* quanto nelle scansioni dell'archivio, $f1$ ed $f2$ in figura, e si confrontano. Nel caso d'esempio, coincidendo le due frazioni, il confronto risulta perfetto, rendendo ottimale la somiglianza. Tuttavia è evidente quanto differenti siano le due scansioni in termini di distribuzione spaziale del campo di pioggia. Per tale motivo questo criterio non è adatto alla determinazione della somiglianza di distribuzione spaziale di riflettività.

Per pura curiosità, è stata condotta nell'ambito del sistema NACO una ricerca per analoghi basata esclusivamente sul *criterio dell'area bagnata*, aggiungendo in più una soglia di riflettività oltre la quale considerare *bagnato* un pixel (23 dBZ), e i primi sei analoghi sono risultati quelli mostrati in FIGURA 7.2. É evidente quanto sia difficile trovare qualche analogia nella distribuzione spaziale tra la *query* (in alto, in grande) e i primi sei analoghi, portando allo scarto immediato di questo criterio.

7.4.4.2 Il criterio per aree

Si arriva, dunque, a uno dei due criteri valutanti la somiglianza di distribuzione spaziale di riflettività utilizzati all'interno del sistema NACO.

Come suggerisce il nome, il *criterio per aree* fonda la ricerca di somiglianza della distribuzione spaziale di riflettività sul confronto di macro-aree in cui la scansione viene suddivisa. La procedura per l'applicazione di questo criterio consiste in una serie di operazioni, qui elencate:

1. **Upscaling estremo delle scansioni.** Utilizzando come riferimento la FIGURA 7.3, e pensando all'immagine di sinistra come alla scansione radar di partenza, la prima operazione consiste nell'*upscaling* di questa, ottenendo la figura di destra. Nello specifico, all'interno del NACO si è scelto di operare un *upscaling* piuttosto estremo, passando dalla scansione originale (con lato di 144 o 288 pixel a seconda

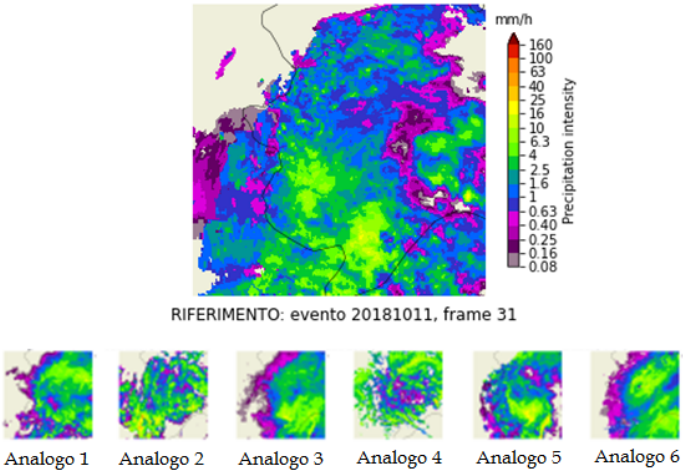


FIGURA 7.2: **Analoghi spaziali con il criterio dell'area bagnata.** In figura si mostrano i risultati di una ricerca per analoghi che ha coinvolto la scansione *query* mostrata in alto, utilizzando come unico criterio di somiglianza quello dell'*area bagnata*. Le sei rappresentazioni in basso mostrano i campi di riflettività associati ai primi sei analoghi ottenuti dalla ricerca, provando quanto possano essere dissimili dalla *query* le scansioni individuate mediante quest'unico criterio.

della regione d'analisi scelta), a un'immagine con 36 grossi pixel totali, 6 per lato. Dovendo assegnare a ciascuno di essi un valore di riflettività, viene condotta la media aritmetica dei valori associati ai pixel di ciascuna macro-area, e tale sarà il valore rappresentativo di ognuna di esse;

2. **Confronto dei macro-valori omologhi.** Disponendo di immagini 6 x 6, occorre confrontare i 36 valori omologhi tra *query* e scansioni dell'archivio, in modo tale da ottenere poi un indice che quantifichi la somiglianza. Chiamando M_1 la matrice 6 x 6 associata alla *query* e M_2 la matrice 6 x 6 associata alla generica scansione dell'archivio, il confronto tra macro-valori omologhi è condotto calcolando il valore assoluto della matrice differenza:

$$|M_1 - M_2| \ .$$

Numeri piccoli identificano aree omologhe contraddistinte da un valor medio simile di riflettività, mentre numeri grandi identificano aree omologhe con notevoli differenze di riflettività;

3. **Calcolo dell'indice di somiglianza.** Per quantificare la somiglianza globale mediante un solo valore, si sommano i 36 macro-valori

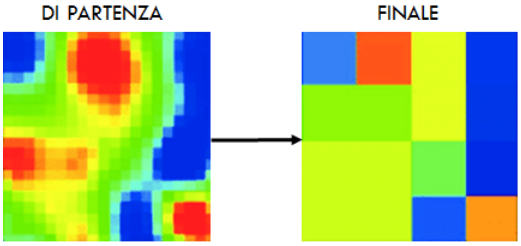


FIGURA 7.3: **Upscaling nel criterio per aree.** Nelle due figure soprastanti viene esemplificata schematicamente l'applicazione dell'*upscaling*. L'immagine originale (a sinistra) viene suddivisa da una griglia regolare, per poi assegnare a ciascuna macro-area prodotta un solo e unico valore, pari alla media dei valori associati ai pixel contenuti in ciascuna macro-area.

contenuti nella matrice differenza:

$$q_1 = \sum \sum |M_1 - M_2| \ .$$

In questo modo il valore risultante, q_1, quantifica la somiglianza tra *query* e immagini dell'archivio secondo questo primo *criterio per aree*. Valori di q_1 più piccoli indicano maggiore somiglianza, per cui la 1^a *cernita* secondo questo *criterio per aree* selezionerà le 30 scansioni dell'archivio con l'indice q_1 più basso.

In FIGURA 7.4, a titolo d'esempio, vengono mostrati i primi sei analoghi ottenuti da una ricerca nell'archivio sulla base del solo *criterio per aree*, senza la successiva valutazione dell'evoluzione temporale del fenomeno precipitativo.

La scelta di condurre l'*upscaling* sino all'ottenimento di esattamente 36 macro-aree deriva da una valutazione basata anche sul secondo criterio di analogia spaziale, descritto nel paragrafo successivo. Infatti, l'idea era di porsi in una condizione intermedia tra due situazioni estreme: la prima, quella di utilizzare un'unica macro-area, 1 x 1, coincidente con l'intera scansione e con associato un valore di riflettività pari alla media dei valori di ciascun pixel al suo interno, ovvero alla media di tutti i pixel dell'immagine (ed è questo l'*Image Mean Flux* utilizzato dal sistema NORA); la seconda, quella di non condurre nessun *upscaling*, e confrontare direttamente i pixel originali omologhi (oggetto del *criterio per pixel* descritto al paragrafo successivo). La via di mezzo, dunque, risiedeva nella definizione di un grigliato né troppo fitto né troppo rado, e si è così optato per il 6 x 6.

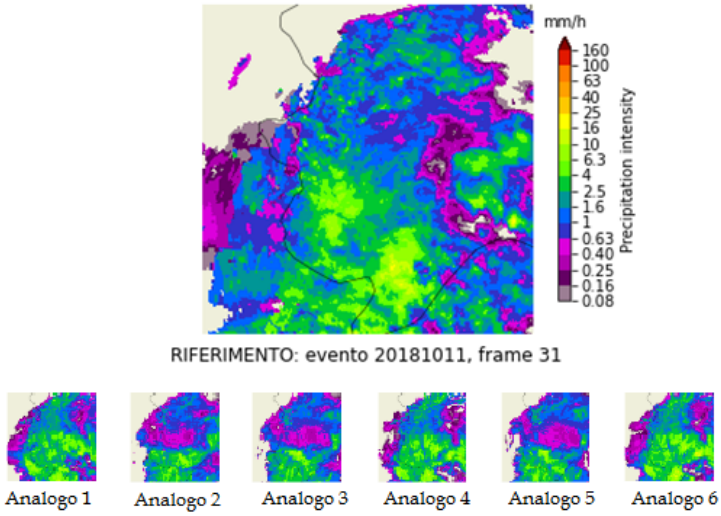


FIGURA 7.4: **Analoghi spaziali con il criterio per aree.** La *query*, nella figura in alto, viene confrontata con le scansioni dell'archivio alla ricerca dei primi sei analoghi secondo il solo *criterio per aree*. In basso, nelle sei piccole scansioni radar, il risultato di tale ricerca. La regione utilizzata per l'analisi è la *terza regione* (si veda la sezione *La scelta delle regioni*, all'interno del capitolo precedente), con matrice associata di dimensioni 288 x 288.

L'implementazione della procedura per l'applicazione del *criterio per aree* sopra descritto è avvenuta utilizzando il linguaggio di programmazione *Python*, con il quale si è messo a punto un algoritmo per l'arbitrario *upscaling* delle scansioni radar originali, scegliendo in seguito di adottare quello portante alla matrice di macro-pixel 6 x 6.

7.4.4.3 Il criterio per pixel

Come già accennato a conclusione del precedente paragrafo, il *metodo per pixel* si distingue dal *metodo per aree* per l'assenza di *upscaling* iniziale. Si tratta ancora una volta di confrontare quantità omologhe tra due scansioni, ma questa volta il confronto non è condotto tra macro-aree date dall'unione di più pixel, bensì tra singoli pixel omologhi.

La procedura, prevedente così un'operazione in meno, è la seguente:

1. **Confronto dei pixel omologhi.** Disponendo della *query* originale e delle scansioni in archivio, si confrontano i valori di riflettività associati ai pixel omologhi mediante la sottrazione matriciale, come per il *criterio per aree*. Questa volta, però, non si tratta di sottrarre due matrici 6 x 6, bensì 288 x 288 se la regione scelta per le analisi è la *regione 3* (144 x 144 nel caso di *regione 2*). Indicando con P_1 e

P_2 le due matrici originali, queste vengono sottratte matricialmente e, una volta applicato il valore assoluto,

$$|P_1 - P_2| \ ,$$

la matrice risultante, che continua ad essere una 288 x 288 (oppure una 144 x 144), contiene la misura, in ogni suo valore, di quanto le due scansioni confrontate siano differenti.

2. **Calcolo dell'indice di somiglianza.** É, similmente a quanto fatto per il *criterio per aree*, la somma dei 288 x 288 valori contenuti nella matrice risultante a fornire la misura globale della somiglianza nella distribuzione spaziale dei due frame confrontati:

$$q_2 = \sum \sum |P_1 - P_2| \ .$$

Questo indice di qualità è tanto minore quanto maggiore è la somiglianza tra due scansioni nel senso del confronto pixel per pixel. Senza il valore assoluto, numeri positivi e negativi si sarebbero potuti annullare, fornendo valori bassi anche per scansioni completamente differenti.

Il motivo per cui si è deciso di utilizzare un secondo criterio, in aggiunta al *criterio per aree*, per la valutazione della somiglianza nella distribuzione spaziale di riflettività risiede nella FIGURA 7.5. Infatti, il risultato in termini di somiglianza che i due criteri fornisco può essere, in linea di principio, fortemente differente. In figura, portando all'estremo il concetto, vengono mostrate due immagini con pixel bianchi e neri disposti a scacchiera, e per quanto le due figure sembrino identiche a una prima occhiata, la figura di destra non presenta mai colori uguali su pixel omologhi: dove da una parte c'è un pixel bianco, dall'altra c'è un pixel omologo nero, e viceversa. Per tale motivo l'applicazione del *criterio per pixel* fornirebbe un valore altissimo di q_2, indicando somiglianza nulla tra i due frame, mentre invece l'applicazione del *criterio per aree*, considerando marco-zone con colore associato pari alla media dei colori (grigio), fornirebbe un valore nullo di q_1, identificando una perfetta somiglianza tra le due scansioni.

Ecco, dunque, che l'informazione veicolata dai due indici di qualità associati ai due criteri può essere molto differente, portando ad analoghi di natura diversa. Se da un lato il *criterio per pixel* perde in *visione d'insieme*, d'altro canto acquista in *precisione*. É per questo motivo che si è voluto

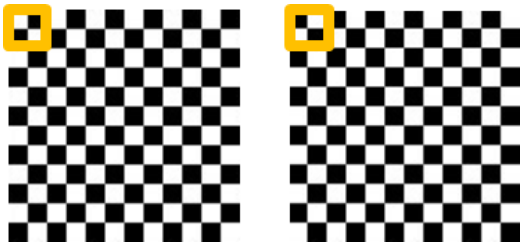


FIGURA 7.5: **Differenza tra criterio per aree e per pixel.** A sinistra, un frame costituito da pixel bianchi e neri disposti a scacchiera, mentre a destra quello che a prima vista pare lo stesso frame, ma che presenta colori scambiati. Per tale motivo, se il *criterio per pixel*, sottraendo valori associati a pixel omologhi, fornirebbe una misura corrispondente a una somiglianza nulla, al contrario il *criterio per aree*, sottraendo valori mediati su insiemi di pixel (ad esempio si consideri macro-aree di 4 pixel, come quella riquadrata in figura), produrrebbe una misura corrispondente a una somiglianza perfetta.

testarli entrambi, consci del fatto che un caso del tipo in FIGURA 7.5 non potrà mai verificarsi nella realtà, e che quindi la differenza di responso dei due criteri non potrà mai essere dissimile in tal guisa.

In FIGURA 7.6 viene riportato un esempio di ricerca di analoghi fondata esclusivamente sul *criterio per pixel*. Confrontando gli analoghi prodotti da questa ricerca con quelli ottenuti in FIGURA 7.4 applicando il solo *criterio per aree*, si noti la differenza nei risultati.

7.4.5 La somiglianza di evoluzione temporale in NACO

Scandagliato l'archivio radar alla ricerca di analoghi al *query* in termini di distribuzione spaziale del pattern di riflettività, si perviene, mediante un algoritmo sviluppato in *Python*, a due liste: l'una contenente i primi 30 frame analoghi secondo il *criterio per aree*, e l'altra contenente i primi 30 frame analoghi secondo il *criterio per pixel*. Le scansioni non contenute in queste liste non saranno più utilizzate.

A questo punto s'introduce la componente di analogia legata all'evoluzione temporale del campo di riflettività. Se, infatti, i 30 frame selezionati con ciascun criterio si basano unicamente sulla somiglianza di distribuzione spaziale di riflettività, questo secondo step li riordinerà in base alla somiglianza di evoluzione temporale rispetto al *query*.

7.4.5.1 Il criterio del campo di moto

Individuando nel *campo di moto* istantaneo quello strumento che possa fornire un'indicazione sull'evoluzione temporale istantanea dell'eco radar,

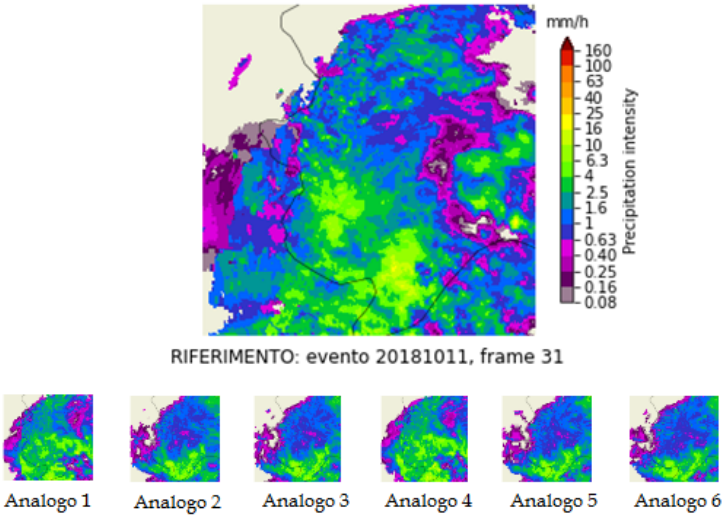


FIGURA 7.6: **Analoghi spaziali con il criterio per pixel.** La *query*, in alto, viene confrontata con tutte le scansioni dell'archivio alla ricerca dei primi sei analoghi secondo il solo *criterio per pixel*. In basso, le sei piccole scansioni radar presentano il risultato di tale ricerca. La regione utilizzata per l'analisi è, ancora una volta, la *terza regione*, di dimensioni 288 x 288, mentre l'evento (il medesimo utilizzato per gli esempi ai paragrafi precedenti) è quello relativo al giorno 11 Ottobre 2018, con *query* delle ore 2:30.

la procedura seguita per arrivare agli analoghi finali, 10 per lista, a seguito della *2ª cernita* consta delle seguenti operazioni:

1. **Calcolo del campo di moto uniforme.** Tanto per la *query* quanto per le 60 scansioni ottenute dalla *1ª cernita* viene calcolato il *campo di moto istantaneo uniforme*. Si tratta di un unico vettore che fornisce un'idea di come si stia spostando l'intero eco radar[1]. Poiché per il suo calcolo occorre disporre non solo della scansione oggetto del calcolo, definita al tempo t_0, ma anche della scansione ad essa antecedente, definita al tempo $(t_0 - \Delta t)$, occorrerà selezionare, per ciascuno dei 60 frame e per la *query*, anche la scansione immediatamente precedente.

2. **Confronto dei campi di moto.** Calcolati i *campi di moto uniformi*, si rende necessario dotarsi di un criterio che confronti quello della *query* con tutti gli altri, definendo univocamente la somiglianza

[1] Per approfondimenti sul suo calcolo – avvenuto mediante l'uso del già citato tool *Pysteps* [89] – si veda, nel capitolo *Il calcolo del campo di avvezione*, il paragrafo *Il campo di moto uniforme* all'interno della sezione intitolata *La tecnica dell'area tracking*.

tra campi di moto. Il criterio utilizzato è quello del *vettore differenza*: chiamando *cost1* il vettore uniforme associato a una scansione, e *cost2* quello associato a un'altra da confrontare, il vettore differenza *diff* misura quanto i due siano differenti, come mostrato nella figura che segue.

3. **Riordino secondo il modulo del vettore differenza.** É il modulo del vettore differenza a definire la somiglianza tra *query* e scansioni, che perciò verranno riordinate secondo il modulo del vettore differenza crescente.

4. **Applicazione della *2ª cernita*.** A questo punto la *2ª cernita* consisterà della selezione delle sole prime 10 scansioni riordinate di ciascuna delle due liste, pervenendo finalmente agli analoghi finali, 10 per metodologia.

Come già sottolineato, si è utilizzato un *campo di moto uniforme* e non un campo di moto più elaborato in primis per i tempi computazionali più ridotti richiesti dal calcolo, tramite Pysteps [89], del campo di moto uniforme, e in secundis per la semplice confrontabilità tra campi di moto uniformi – è sufficiente il calcolo di un vettore differenza.

Per i medesimi motivi di costo computazionale si è applicato il criterio di analogia basato sull'evoluzione temporale del fenomeno piovoso solo in un secondo momento, quando ormai si disponeva di soli 60 frame da analizzare, e non 23 000: la procedura di calcolo del campo di moto per ogni singola scansione dell'archivio iniziale avrebbe richiesto, con il modesto calcolatore di cui si dispone, ore di elaborazione. Per tale motivo si è pensato di limitare la fase di analogia temporale a un archivio già enormemente scremato da una prima fase basata sulla sola analogia spaziale.

7.5 Fase 3 – Il confezionamento della previsione

Una volta individuati gli analoghi *migliori* a conclusione della **Fase 2**, il 99% del lavoro è compiuto. Infatti la **Fase 3** consiste semplicemente

nell'estrazione, dall'archivio radar, delle scansioni che rappresentano l'immediato *futuro* degli analoghi individuati, e nel loro utilizzo per fornire una previsione relativa alla *query*.

L'assunzione alla base di qualsiasi *metodo degli analoghi* è che, come già esposto in precedenza, *a situazioni analoghe corrispondano futuri analoghi* e, nello specifico caso delle previsioni meteorologiche, *a condizioni meteorologiche analoghe facciano seguito sviluppi meteorologici analoghi*. Che le condizioni meteorologiche riguardino variabili termodinamiche oppure grandezze di altro tipo, l'assunzione è la medesima, ed è per questo motivo che, applicando questo concetto alla *riflettività* Z, si può pervenire a una previsione fondata esclusivamente sulle distribuzioni di riflettività successive agli analoghi individuati.

Che per alcune grandezze meteorologiche l'individuazione di un'analogia con situazioni del passato possa significare in misura maggiore o minore un'analogia anche nello sviluppo, ciò è facilmente ipotizzabile, rendendo non tutte le variabili adatte ugualmente alla previsione per analoghi. Le prime idee sull'uso di una metodologia di previsione meteo fondata sugli analoghi giunsero quando alcuni studi mostrarono, a metà degli anni '50, che alcuni pattern meteorologici tendevano a ripetersi nel tempo in corrispondenza delle medesime aree geografiche. Di lì, l'introduzione del concetto di *analoghi* nella fisica atmosferica, e una delle prime definizioni di essi fornita da Lorenz [62]: *il termine analoghi si riferisce a due o più stati dell'atmosfera che si assomigliano così tanto da poter dire frutto di errori di osservazione le differenze tra di essi.*

Da queste prime definizioni di *analoghi* in ambito meteorologico, sempre più numerosi furono gli studi che puntavano a individuare, nell'evoluzione di situazioni meteorologiche analoghe alla corrente, la previsione, ed è su questa scia che si pone anche questo studio.

Sono due le possibilità che si presentano una volta individuati i migliori analoghi e, assieme a essi, le scansioni radar che fanno loro seguito:

- **Previsione deterministica:** si seleziona solamente un analogo tra i 10 analoghi finali, il migliore in assoluto, e si fornisce la previsione esclusivamente in base a lui. In modo molto semplice, la previsione per l'immediato futuro della *query* coincide esattamente con le scansioni radar osservate dopo l'analogo;

- **Previsione probabilistica:** si utilizzano tutti e 10 gli analoghi individuati per produrre una previsione che non dia un unico futuro possibile, come la *deterministica*, bensì associ una certa probabilità

a un certo scenario futuro, includendo così una misura d'incertezza all'interno della previsione. Ciò è possibile grazie all'individuazione contemporanea dei 10 possibili scenari futuri.

Per ulteriori dettagli sulle due possibilità, si rimanda direttamente al prossimo capitolo, in cui verranno condotte alcune analisi esemplificative in seguito all'applicazione della metodologia per analoghi sviluppata.

Capitolo 8

NACO – Le analisi

8.1 Introduzione al capitolo

Delineate le caratteristiche del metodo per analoghi sviluppato e definite le 3 Fasi che ne costituiscono la procedura, in questo capitolo si provvederà ad applicare il metodo NACO su un caso d'esempio, in modo tale da testarne la bontà di previsione anche confrontata con altri metodi di nowcasting.

All'interno della prima sezione, intitolata *Il caso studio*, si descriveranno le caratteristiche della *query* scelta, e conseguentemente dell'archivio storico di cui poter disporre. Successivamente, nella sezione *L'applicazione del metodo NACO* si opererà la ricerca degli analoghi vera e propria, pervenendo nelle sezioni successive a due previsioni *deterministiche* e a una *probabilistica*. Infine, all'interno della sezione intitolata *Il confronto con i metodi di estrapolazione* si condurrà un'analisi delle *forecasting skills* del metodo NACO comparate con quelle associate ai metodi di estrapolazione.

8.2 Il caso studio

All'interno di questa sezione sarà definita la base dati oggetto delle analisi: dalla definizione della regione d'analisi, alla scelta della *query*, sino alla caratterizzazione dell'archivio a disposizione per la ricerca degli analoghi.

8.2.1 La scelta della regione

Il primo passo per condurre una previsione secondo il metodo NACO sviluppato è quello di scegliere una *query*. Prima, però, occorre scegliere la regione geografica sulla quale condurre le analisi (si veda il paragrafo *La scelta della regione* all'interno del capitolo *NACO – I dati radar*).

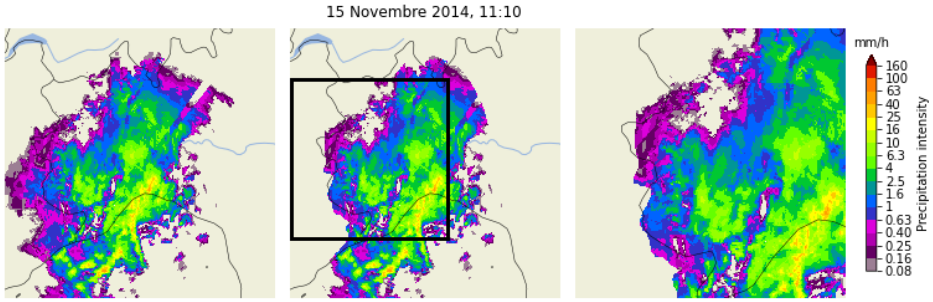


FIGURA 8.1: **La query selezionata.** Nelle tre figure, tre diverse rappresentazioni della scansione selezionata. Si tratta della scansione delle 11:10 del giorno 15 Novembre 2014, appartenente all'evento 60. A sinistra, la scansione sull'intera *Area B*. Al centro, la sua elaborazione dopo aver rimosso la parte di eco radar relativa a una quota minima del fascio oltre i 5 000 m. Infine, a destra, l'ingrandimento relativo alla *Regione 3*, riquadrata in nero nell'immagine centrale.

Si sceglie di utilizzare la *Regione 3*, un'area caratterizzata da una matrice di celle geografiche 288 x 288, con ciascuna cella di lato 800 m. Per questa regione non è possibile utilizzare l'intero archivio, ma solamente gli eventi descritti sull'*Area B*, in quanto quelli relativi all'*Area A* non coprirebbero l'intera regione.

8.2.2 La scelta della query

Con un archivio perciò limitato ai soli 43 eventi descritti sull'*Area B*, corrispondenti a 53 giornate intere di dati radar, si seleziona una *query* all'interno di esso, con il vincolo di non poterla selezionare tra le due ore conclusive di ciascun evento (come già sottolineato nel capitolo precedente parlando di *Fase 1*, mancherebbero le osservazioni ad essa successive, e di conseguenza non potrebbe condursi la verifica delle qualità previsionali del metodo). Scegliendo, inoltre, di optare per una *query* che mostri un ampio campo di riflettività al suo interno, caratterizzato altresì da una certa intensità di pioggia, si perviene alla *query* mostrata in FIGURA 8.1.

Nella medesima figura appena citata viene anche mostrato il *taglio* della scansione radar dovuto all'applicazione della *maschera di visibilità* (si veda il paragrafo *La maschera di visibilità*, sezione *I radar gestiti da ARPA Piemonte*, all'interno di questo stesso capitolo). Come mostrato per la *query*, questo *taglio*, dovuto all'assunzione che l'eco di ritorno da punti con altezza minima del fascio oltre i 5 000 m non siano portatori di informazioni complete sulla precipitazione, verrà condotto su tutte le scansioni radar presenti nell'archivio.

Tornando alla *query*, si tratta di una scansione appartenente all'evento giornaliero numero 60 del 15 Novembre 2014, un evento di cui si dispone di scansioni radar per tutte le 24 h della giornata, fornite ogni 5 minuti. Nello specifico, la *query* scelta è la scansione delle 11:10, ben lontana dall'ultima scansione dell'evento, oltre 12 ore più tardi.

8.2.3 La costruzione dell'archivio

Ai fini della costruzione dell'archivio radar in cui svolgere la ricerca degli analoghi, le osservazioni relative all'intera giornata del 15 Novembre 2014 non possono essere utilizzate per evitare qualsiasi tipo di correlazione. Sono, perciò, le prime scansioni a essere eliminate dall'archivio radar, dopo ovviamente l'esclusione delle scansioni relative ai 38 eventi descritti sull'*Area A*.

Da 43 eventi, quelli relativi all'*Area B*, ne rimangono 42. Non finisce qui, poiché occorre eliminate le ultime 2 h di osservazione di ogni singolo evento, in quanto selezionare un analogo tra essi comporterebbe non poter disporre di almeno due ore di osservazioni successive, impedendo la previsione per analoghi. Per gli eventi del 2008, con scansioni ogni 10 minuti, ciò si traduce nel privarsi di 12 scansioni, mentre per i restanti (la maggior parte), descritti da scansioni ogni 5 minuti, vuol dire privarsi di 24 osservazioni radar per ciascuno di essi.

In ultimo, non è possibile individuare analoghi che costituiscano la primissima scansione di un evento, in quanto non esisterebbe una scansione immediatamente precedente e non sarebbe così possibile calcolare il campo di moto istantaneo associato all'eco radar.

Condotti questi tagli all'archivio, restano circa 13 000 scansioni tra le quali poter condurre la ricerca.

8.3 L'applicazione del metodo NACO

Scelta una *query* e creato l'archivio radar, la ricerca degli analoghi può iniziare. Da questa sezione scaturiranno i 20 analoghi finali, 10 per linea di ricerca, mediante i quali sarà possibile condurre, nella successiva sezione, una previsione a brevissimo termine.

8.3.1 L'ottenimento degli analoghi

Decisa la scansione *query* rappresentativa delle condizioni meteorologiche correnti, e determinato il database di scansioni storiche, si può finalmente

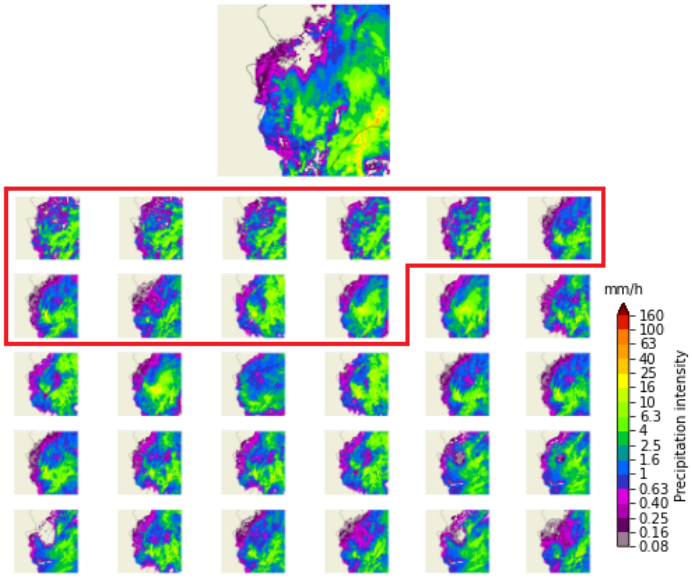


FIGURA 8.2: **Primi 30 analoghi secondo il criterio per aree.** In figura vengono mostrati i risultati della ricerca degli analoghi secondo il *criterio per aree*. In alto la *query* scelta, mentre in basso le trenta scansioni ottenute dalla ricerca degli analoghi, già riordinate secondo il *criterio del campo di moto*. Le scansioni riquadrate in rosso rappresentano i 10 analoghi finali, per il filone degli analoghi individuati secondo il criterio spaziale *per aree*.

procedere all'applicazione del metodo NACO, e iniziare la caccia agli analoghi. Lasciando i dettagli sulle caratteristiche del metodo NACO all'apposito capitolo *NACO – Il metodo*, in questa sede si riprenderanno solamente gli aspetti essenziali della ricerca, ponendo una particolare attenzione sugli aspetti computazionali che la rendono possibile.

Come già precedentemente affermato, il codice sorgente per condurre la ricerca degli analoghi è stato scritto nel linguaggio Python, facendo uso dell'ambiente *Jupyter Notebook* per la sua esecuzione. L'algoritmo che esegue la ricerca passa in rassegna ogni singola scansione contenuta dell'archivio, e ne esegue il confronto con la *query* in termini di distribuzione spaziale di riflettività, prima mediante il *criterio per aree*, poi mediante il *criterio per pixel*. Calcolati i valori degli indici di somiglianza q_1 e q_2 associati ai due criteri spaziali, salva questi all'interno di un dizionario (un oggetto tipico del linguaggio Python), associandoli alla specifica scansione a cui si riferiscono. Condotta quest'operazione per tutte le scansioni dell'archivio (un algoritmo di ottimizzazione permette di non salvare i dati relativi a tutte le 13 000 scansioni dell'archivio, eliminando già in fase di analisi quelle con indici spaziali peggiori), si perviene, per ciascuno dei due

criteri, ai 30 migliori analoghi, quelli con associati gli indici q_1 e q_2 più ridotti.

Su questi viene condotta la seconda analisi, finalizzata al riordino secondo la somiglianza nell'evoluzione temporale del campo di riflettività. A tale scopo viene calcolato il *campo di moto uniforme* associato a ciascuna delle scansioni sopravvissute, e per farlo si ricorre alla scansione immediatamente precedente a ognuna di esse. Ordinato ciascun gruppo di 30 analoghi secondo il modulo del vettore differenza, la selezione degli analoghi finali comprende i primi 10 di ciascuno dei due gruppi. In FIGURA 8.2 e in FIGURA 8.3 vengono mostrati i primi 30 analoghi alla *query* scelta, ottenuti secondo il *criterio del campo di moto* abbinato al *criterio per aree* da un lato, e abbinato al *criterio per pixel* dall'altro.

Confrontando i risultati contenuti nelle due figure appena citate, può notarsi immediatamente come i due criteri di somiglianza spaziale conducano ad analoghi differenti. Talvolta alcune scansioni analoghe sono in comune tra le due linee di ricerca, ma l'ordine in cui sono disposte risulta essere generalmente diverso. Ciò conferma la differente filosofia dietro la ricerca della somiglianza di distribuzione spaziale dei due criteri adottati, giustificando l'utilizzo di entrambi, a fornire due distinte liste di analoghi possibili, riconducibili a due distinte linee di ricerca.

8.3.2 L'apporto di Pysteps

Come già sottolineato, il *campo di moto uniforme* viene calcolato mediante il tool per il nowcasting chiamato *Pysteps* [89]. Si tratta di un tool open-source scritto in Python, e continuamente aggiornato dalla comunità scientifica. Nato per implementare il sistema STEPS, *Short-Term Ensemble Prediction System* [20] (da cui il nome, unente il linguaggio d'implementazione PYthon al sistema STEPS), permette di generare una serie di altre tipologie di previsioni a brevissimo termine, mettendo a disposizione una vasta gamma di strumenti utili a tal fine.

In questo studio si è fatto uso di diverse sue funzionalità, come in questo caso della routine che calcola il *campo di moto uniforme*. Sottolineando, come già fatto in precedenza, che la dicitura *campo di moto* non è pienamente corretta (tecnicamente sarebbe meglio parlare di *campo medio di avvezione dell'eco radar*, ma per brevità e per immediata associazione si è preferito utilizzare la dicitura *campo di moto*), si riporta che il calcolo di esso viene condotto, in Pysteps, cercando quel vettore che, operando una traslazione rigida della scansione al tempo $(t_0 - \Delta t)$, massimizzi la correlazione tra questa e la successiva immagine al tempo t_0.

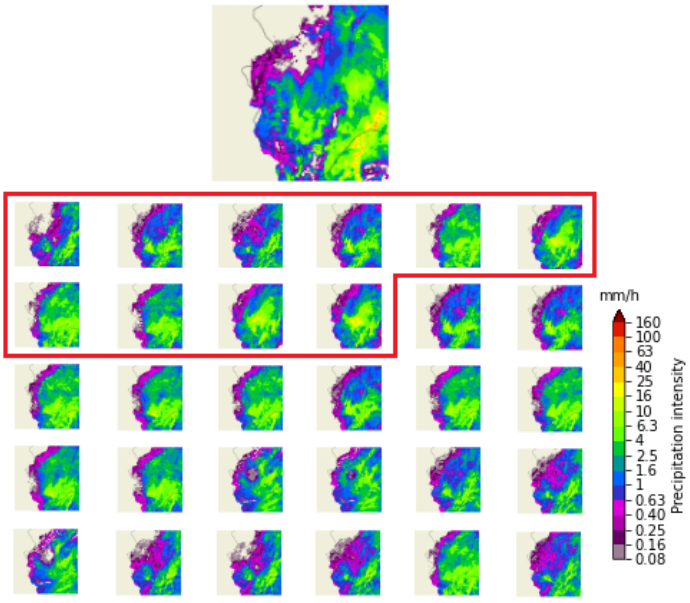


FIGURA 8.3: **Primi 30 analoghi secondo il criterio per pixel.** In figura vengono mostrati i risultati della ricerca degli analoghi similmente a quanto fatto in FIGURA 8.2, ma questa volta secondo il *criterio per pixel*.

Anche la visualizzazione delle scansioni radar e la loro georeferenziazione è stata possibile grazie alle routine messe a disposizione da Pysteps. Inoltre, come a breve si vedrà, la generazione di una previsione di nowcasting basata sull'estrapolazione Lagrangiana è stata gestita, con opportune modifiche, quasi interamente dai moduli di Pysteps.

8.4 La previsione deterministica

Giunti, secondo due diverse linee di ricerca, ai 10 migliori analoghi, la previsione può finalmente essere confezionata. Da un lato si può pensare di scegliere il primissimo degli analoghi, e basare il pronostico unicamente su di lui, generando una *previsione deterministica*. Dall'altro lato, l'utilizzo contemporaneo dei migliori 10 analoghi porterebbe alla generazione di una *previsione probabilistica*.

In questo paragrafo si esploreranno le potenzialità di una tipologia *deterministica* di previsione, prodotta non solo mediante l'uso esclusivo del primo analogo (secondo quella che sarà chiamata *previsione del primo analogo*), ma anche attraverso l'utilizzo contemporaneo di tutti e dieci gli analoghi migliori: la *previsione per ensemble mean*.

8.4.1 Il primo analogo

Essendosi sviluppate due distinte linee di ricerca degli analoghi, si sono create due distinte classifiche in base all'analogia, pervenendo a due distinti analoghi definibili *migliori primi*, e di conseguenza giungendo a due possibili previsioni deterministiche basate sul migliore tra gli analoghi. Solamente per la linea di ricerca utilizzante il criterio *per aree* si forniranno tutti i dettagli dell'analisi, mentre per quella utilizzante il criterio *per pixel* verrà solamente fornito qualche risultato rilevante.

8.4.1.1 La linea di ricerca per aree

In FIGURA 8.4 viene mostrato il caso relativo al primo analogo secondo la linea di ricerca che utilizza, come criterio di somiglianza spaziale, quello *per aree*. Dai risultati della ricerca, questo primo analogo corrisponde alla scansione delle ore 00:30 del 16 Maggio 2013, giorno coincidente con l'evento numero 55 e descritto da scansioni ogni 5 minuti.

Poiché la previsione consiste esattamente nelle osservazioni che seguono il primo analogo, in FIGURA 8.4 sono mostrate le 24 scansioni radar che seguono a ruota la *query* (quelle nelle due colonne con sopra indicato *query*), e al fianco di ciascuna di esse le 24 scansioni radar che seguono il primo analogo, potendo così operare un rapido confronto visivo tra esse. Oltre a notare quella che sembra una *buona* analogia, si può vedere come l'intensificarsi dell'evento relativo alla *query* – rivelato da un colore sempre più acceso al trascorrere del tempo, segno di crescente riflettività – segua parallelamente un'intensificazione del fenomeno piovoso relativo al primo analogo.

Per quantificare l'andamento dell'analogia con lo scorrere del tempo, e quindi la qualità della previsione condotta usando il primo analogo, si utilizza un metodo di verifica implementato da Pysteps: il *Fractions Skill Score*, abbreviato con la sigla FSS. Questo metodo di verifica tiene conto della distribuzione spaziale di riflettività, come i criteri *per aree* e *per pixel* da noi sviluppati, rappresentando una generalizzazione di questi ultimi. Infatti esso calcola, all'interno di aree spaziali arbitrariamente sceglibili, la frazione di pixel con associato un valore di [dBZ] che supera una certa soglia, definibile a piacere, e confronta tale valore tra aree spaziali omologhe tra due scansioni (un'*osservazione* e una *previsione*). L'area spaziale, detta *moving window*, si sposta di continuo, centrata a turno sui vari pixel dell'immagine, e ripete il calcolo della frazione, pervenendo alla fine a un valore di FSS compreso tra 0 e 1. Questo tiene in considerazione i diversi

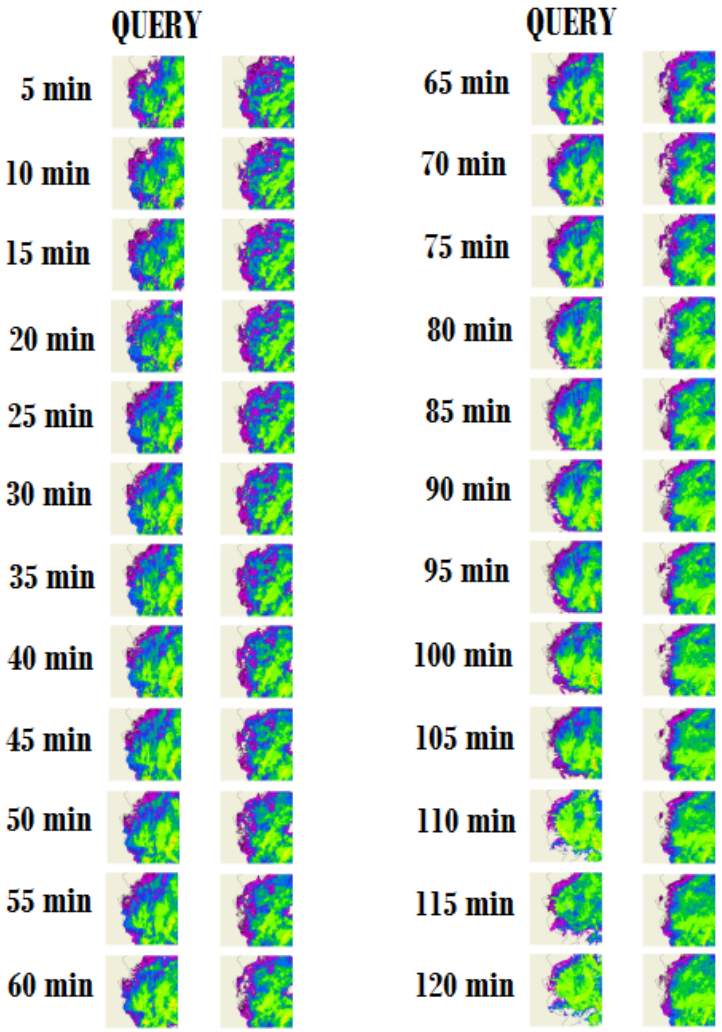


FIGURA 8.4: **Confronto del futuro tra query e primo analogo.** Nella figura soprastante viene condotto un confronto visivo tra le scansioni che seguono la *query*, e quelle che seguono il primo analogo ottenuto mediante la linea di ricerca *per aree*, corrispondente alla scansione delle ore 00:30 del giorno 6 Maggio 2013. Divise in due blocchi da 12, le 24 scansioni coprenti le due ore successive alla *query* e al primo analogo sono affiancate a produrre coppie omologhe, in modo tale che possa valutarsi, almeno a un primo sguardo, la somiglianza delle scansioni man mano che il tempo scorre. Nelle colonne di sinistra, le scansioni che seguono la *query*, mentre in quelle di destra quelle che seguono il primo analogo.

confronti tra aree omologhe effettuati allo spostarsi della *moving window*, ed è tanto più vicino a 1 quanto maggiore è la somiglianza di distribuzione spaziale tra le due scansioni confrontate. Poiché la dimensione della *moving window* può scegliersi arbitrariamente, è intuitivo che tanto più grande essa risulta, tanto maggiore sarà il campione di pixel soggetto alla misura, e tanto maggiore sarà la probabilità di ottenere buona somiglianza tra le scansioni. É per questo che, all'aumentare della dimensione della *moving window* (dimensione spesso direttamente chiamata *scala spaziale* del FSS), i risultati in termini di FSS miglioreranno.

I criteri *per aree* e *per pixel* sviluppati in questo lavoro rappresentano, come risulta perciò evidente, delle versioni del FSS a scala spaziale fissata (scala del singolo pixel, quindi di 0.8 km, per il criterio *per pixel*, scala di circa 40 km per quello *per aree*). Cambia la filosofia, in quanto se nel FSS si confronta la frazione di pixel che superano una certa soglia di riflettività, nei due criteri qui sviluppati si guarda al valore stesso di riflettività, o a una sua media.

Si può così procedere al calcolo del FSS per il primo analogo. Fornendo a Pysteps le 24 scansioni che seguono la *query* e le 24 che seguono il primo analogo, mostrate in FIGURA 8.4, il risultato al variare delle dimensioni della *moving window* è presentato in FIGURA 8.5. La prima cosa che può notarsi è il migliorare del FSS all'aumentare della *scala spaziale* utilizzata per la *moving window*, ma questo era stato già preannunciato. Un fenomeno, invece, piuttosto curioso è rappresentato dall'andamento delle curve nel tempo: si evidenzia una crescita di queste, sintomo di un miglioramento della previsione con lo scorrere del tempo. Per quanto questo paia un fenomeno piuttosto strano, è dovuto al casuale intensificarsi contemporaneo della precipitazione tra scansioni associate alla *query* e scansioni associate al primo analogo, a tal punto da migliorare addirittura l'analogia delle scansioni con lo scorrere del tempo.

Se l'intensificarsi contemporaneo era evidente in FIGURA 8.4, il migliorare progressivo della previsione può tuttavia lasciare ancora qualche perplessità. Perché ciò significherebbe che, spostando di poco più di un'ora la *query*, uno dei migliori analoghi, se non il primissimo, dovrebbe risultare ancora una volta quello associato all'evento del 6 Maggio 2013, anch'esso spostato di circa un'ora in avanti.

Allora, come prova ulteriore, si è condotta la verifica appena delineata, scegliendo come *query* una scansione del medesimo 15 Novembre 2014, ma delle ore 12:30 rispetto alla precedente delle 11:10. Svolgendo una nuova ricerca degli analoghi all'interno del database con questa nuova *query*, il

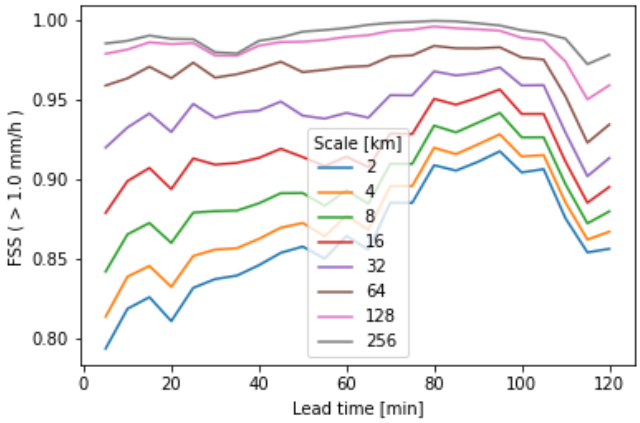


FIGURA 8.5: **FSS nel tempo tra query e primo analogo (aree).** In figura, l'andamento del FSS nel tempo derivante dal confronto tra le osservazioni dopo la *query* e quelle dopo il *primo analogo*. La soglia di riflettività rispetto alla quale calcolare le frazioni del FSS si è scelta pari a 23 dBZ, corrispondente a un'intensità di pioggia di circa 1 mm/h, a seconda della relazione di conversione Z-R scelta. Il calcolo del FSS è condotto al variare della dimensione della *moving window*, da 2 km sino a 256 km di lato (in figura indicato semplicemente come *scale*, scala spaziale). Notando addirittura una crescita nel FSS con lo scorrere del tempo, si rimanda al testo per ulteriori dettagli.

primo analogo trovato seguendo la linea di ricerca *per aree* (oltre che *per pixel*) è stato proprio quello relativo a una scansione del 6 Maggio 2013, questa volta non delle 00:30, ma di un'ora e mezza dopo, ovvero delle 02:00. Ciò rendeva biunivoca la somiglianza tra l'evento del 15 Novembre 2014 e quello del 6 Maggio 2013, ma non confermava ancora gli alti FSS osservati nel diagramma precedente in corrispondenza di un *lead time* oltre l'ora.

Per confermarli, si è graficato l'andamento del FSS anche per questa seconda *query* e il suo primo analogo, ottenendo le curve in FIGURA 8.6. Ecco immediatamente palesatisi gli elevati valori di FSS (tra 0.9 e 1.0 a seconda della scala spaziale) stranamente ottenuti in FIGURA 8.5, ed ecco ottenuta la conferma che, dietro quel primo grafico, si nascondeva un casuale aumento di analogia al trascorrere del tempo, confermato dalla ricerca per analoghi su di una *query* relativa a un'ora e mezza dopo.

Si noti, in FIGURA 8.6, lo schiacciamento delle curve verso l'alto, dovuto alla presenza di un picco negativo locale. Questo si verifica in corrispondenza di una scansione assente nell'evento del 6 Maggio 2013 e, in quanto assente (ovvero presente ma vuota), dante FSS nullo in quel solo punto. Questo fenomeno schiaccia le curve in alto, e sembra rendere molto diverso il grafico rispetto a quello in FIGURA 8.5.

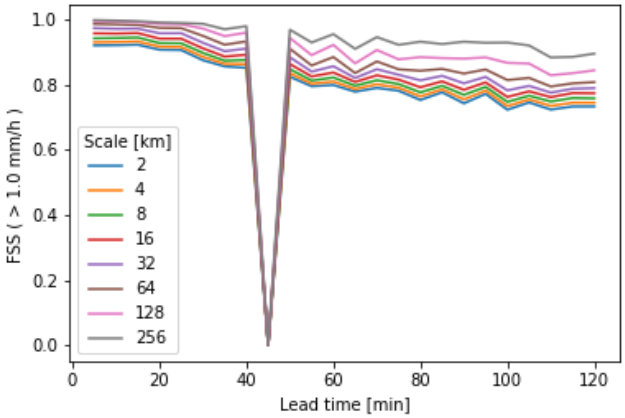


FIGURA 8.6: **FSS nel tempo tra query spostata e primo analogo.** In figura, l'andamento del FSS nel tempo derivante dal confronto tra le osservazioni dopo la *query* spostata in avanti di circa un'ora e mezza, e quelle dopo il *primo analogo* (anch'esso risultato spostato in avanti di circa un'ora e mezza rispetto al precedente primo analogo). Ancora una volta il calcolo del FSS è condotto al variare della dimensione della *moving window*, da 2 km sino a 256 km di lato. Si nota che si hanno immediatamente valori di FSS molto elevati, da 0.9 in su, per poi assistere a un progressivo abbassarsi delle curve, sintomo di una perdita progressiva di analogia, mantenendo però livelli di FSS comunque alti.

Tornando a quest'ultima figura, oggetto principale delle analisi, si possono sottolineare ulteriori dettagli interessanti. In primo luogo, lo strano andamento a zig-zag delle curve, che quasi scientificamente salgono per un tratto temporale di 5 minuti, per poi stazionare o scendere nel tratto successivo. Questo andamento, piuttosto inspiegabile se si pensa a un'evoluzione fluida e armoniosa degli echi radar nel tempo, può spiegarsi ammettendo qualche anomalia nelle scansioni radar. Infatti, indagando all'interno dei file CRI associati a ciascuna scansione radar, in corrispondenza del blocco di informazioni relativo ai radar utilizzati per l'ottenimento della singola scansione, si nota che sono sì utilizzati tanto il radar Bric della Croce quanto il radar Monte Settepani per l'ottenimento della mappa radar composita, ma la componente di eco proveniente dal radar Settepani viene aggiornata ogni 10 minuti e non ogni 5 come quella proveniente dal radar Bric. Ciò comporta che la variazione vera di eco radar si abbia ogni 10 minuti, mentre nel mezzo si assista solamente a una lieve variazione del campo di riflettività, dovuta a solo una delle componenti d'eco partecipanti al composito, quella relativa al radar Bric, mentre quella associata al radar Settepani resta immobile. É per questo motivo che le curve del FSS

presentano quello strano andamento a zig-zag.

In più, altra stranezza che si nota in FIGURA 8.5 risiede nella parte finale delle curve, per *lead time* ormai ben oltre l'ora e mezza. Si assiste, infatti, a una brusca discesa delle curve, piuttosto innaturale a prima vista. E difatti la ragione risiede ancora una volta all'interno dei file CRI associati a quelle ultime scansioni. Quello che emerge è che, dalle ore 13:00 in poi del giorno della *query*, il 15 Novembre 2014, dal composito radar sparisce il contributo del radar Monte Settepani e resta solamente quello del Bric della Croce, determinando quella brusca discesa anomala per via di un campo di riflettività piuttosto differente rispetto ai precedenti (lo si noti, per quanto sia possibile, nelle ultime 3 scansioni relative alla *query* in FIGURA 8.4).

8.4.1.2 La linea di ricerca per pixel

Per quanto concerne il filone di ricerca degli analoghi caratterizzato dal criterio di somiglianza spaziale *per pixel*, non si ripete l'analisi dettagliata condotta per l'altra linea di ricerca, ma si forniscono direttamente alcuni risultati degni di nota.

Con l'idea di generare una previsione deterministica sulla base, ancora una volta, della scansione con la migliore analogia, si seleziona il primo dei 10 analoghi finali. Si tratta della scansione delle ore 17:55 relativa al giorno 25 Dicembre 2013, appartenente all'evento di 48 h numero 56. Si nota innanzitutto che non coincide con l'evento relativo al primo analogo secondo la linea di ricerca *per aree*. Tuttavia quel 16 Maggio 2013 ricorre molto spesso anche nell'elenco dei primi 30 analoghi ottenuti seguendo questa seconda linea di ricerca, confermandosi una giornata particolarmente analoga, in termini di fenomeno precipitativo, a quella della *query*.

In FIGURA 8.7, similmente a quanto fatto per la linea di ricerca *per aree*, viene fornito il diagramma del FSS relativo al primo analogo. Ancora una volta si modifica la scala spaziale da 2 km sino a 256 km, e il *lead time* si lascia che arrivi sino alle 2 h, orizzonte temporale limite oltre il quale non s'intende spingersi.

Come nel caso della prima linea di ricerca, anche in questo caso le curve del FSS si innalzano al trascorrere del tempo, sintomo di un progressivo miglioramento dell'analogia. Anche in questo caso la motivazione risiede in un casuale aumento di somiglianza tra futuro della *query* e futuro del primo analogo all'aumentare del tempo di previsione.

Per mostrare che questo strano andamento non costituisce la regola, bensì l'eccezione, in FIGURA 8.8 si riportano i diagrammi dei FSS relativi ad alcuni dei restanti 9 analoghi finali ottenuti seguendo la linea di ricerca *per*

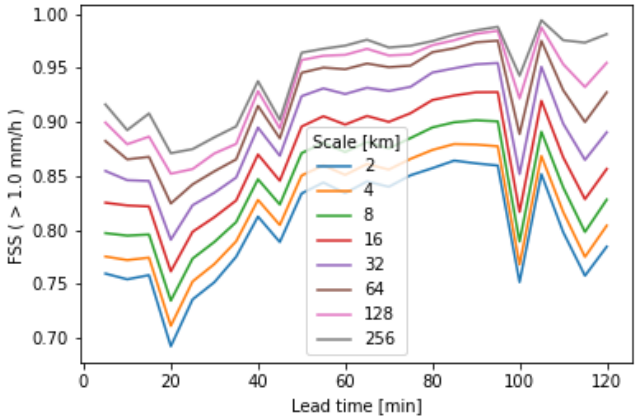


FIGURA 8.7: **FSS nel tempo tra query e primo analogo (pixel).** In figura, l'andamento del FSS nel tempo derivante dal confronto tra le osservazioni dopo la *query* e quelle dopo il *primo analogo*, nel caso di linea di ricerca per pixel. Si nota che, pur trattandosi di un evento analogo differente, l'andamento del FSS risulta ancora una volta crescente nel tempo, come nel caso della prima linea di ricerca (si veda FIGURA 8.5). La ragione è da ascriversi nuovamente a un fortuito miglioramento dell'analogia al crescere del *lead time*.

pixel. La data sopra ciascun grafico identifica l'evento a cui esso è associato, e il numero al suo fianco identifica il numero progressivo della scansione (essendo 288 le scansioni totali sulle 24 h, è sufficiente un rapido calcolo per ottenere l'orario relativo a ciascun numero). Si può notare come due delle quattro date siano uguali, ma essendo il numero progressivo indicante la scansione sufficientemente distante, si garantisce una certa decorrelazione tra esse.

Facendo riferimento sempre alla FIGURA 8.8, si nota immediatamente che nessuno dei quattro grafici presenta un andamento crescente del FSS, ma al più tendente a stazionare, come risulta evidente nel caso in alto a destra. Inoltre, sempre in merito a quest'ultimo caso, risultano piuttosto elevati i valori di FSS, che si aggirano tra 0.9 e 1.0, peggiorando leggermente per *lead time* prossimi alla due ore. L'evento associato è ancora una volta il 16 Maggio 2013, ma l'orario coinvolto non è quello delle 00:30, bensì corrisponde alle 02:50. Ecco, come preannunciata, la presenza di quest'evento anche tra gli analoghi individuati tramite questa seconda linea di ricerca. Compare anche in basso a sinistra, ma relativamente a un orario ancora differente, le 04:10 del mattino.

Infine, si sottolinea ancora una volta che le brusche variazioni a salto che avviliscono il diagramma in basso a destra, relativo all'evento del 30

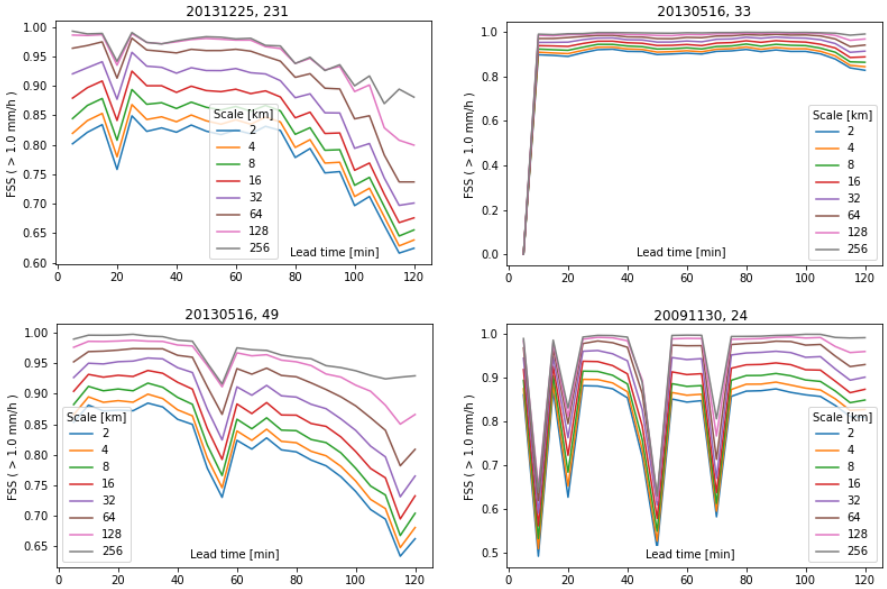


FIGURA 8.8: **FSS nel tempo tra query e alcuni analoghi finali (pixel).** Nelle quattro figure soprastanti sono mostrati, seppur in piccolo, gli andamenti del FSS per quattro dei restanti nove analoghi finali ottenuti seguendo la linea di ricerca *per pixel*.

Novembre 2009, sono dovute alla improvvisa mancanza di scansioni da parte del radar Monte Settepani, ma anche a delle anomalie nelle scansioni stesse, che presentano da un lato improvviso sbalzi nei valori di riflettività da una scansione all'altra, e dall'altro grosse zone senza dati scavate senza preavviso all'interno dei pattern radar di riflettività. Per mostrare la particolarità della situazione, in FIGURA 8.9 è condotto uno studio di corrispondenza tra le prime 12 scansioni radar che fanno seguito alla scansione del 30 Novembre 2009 oggetto di stupore, e i diversi punti a salto del grafico del FSS, giustificando così il balordo andamento rinvenuto nel diagramma in basso a destra.

8.4.2 L'ensemble mean

Oltre alla selezione del primo dei 10 analoghi finali, c'è un secondo modo per fornire una previsione di tipo *deterministico*, e adopera tutti e 10 gli analoghi finali: l'*ensemble mean*, anche detta *ensemble average*. Traducibile in malo modo come *media dell'insieme*, sarebbe più corretto usare la forma estesa e parlare di *media degli ensemble members*.

Questa tecnica, il cui nome si spiegherà a breve, si fonda sul fatto che

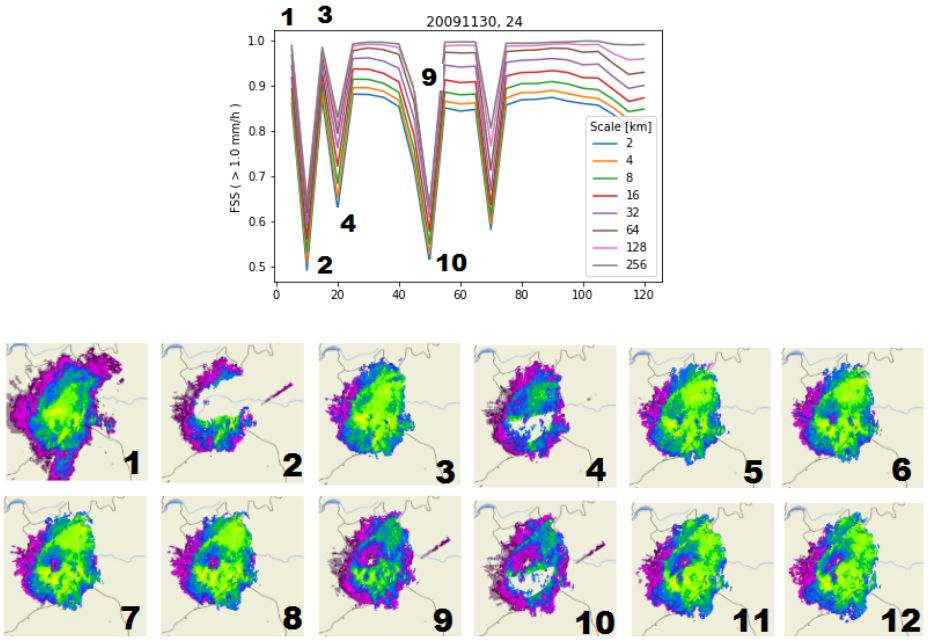


FIGURA 8.9: **Anomalie diffuse nell'andamento del FSS.** In figura è approfondito il caso dell'analogo del 30 Novembre 2009. Le diverse anomalie nell'andamento del FSS sono relazionate, mediante numeri, alle scansioni che le hanno generate. Uno sguardo alla sequenza di immagini radar in basso rende evidente l'improvviso calo generale di riflettività tra una scansione e la successiva, oppure l'improvvisa creazione di una bolla senza dati, due motivi di andamento a salto del FSS.

si dispone, potenzialmente, di 10 possibili scenari futuri su cui basare la previsione. Si dispone, cioè, di un *gruppo* di scenari, detto *ensemble*, i cui elementi sono detti *members*, membri del gruppo. In questo caso si dispone di 10 *members* all'interno dell'*ensemble*, tutti rappresentanti dei possibili scenari di futuro.

Per ottenere, allora, una previsione deterministica basata su tutti i membri dell'ensemble, si può pensare di mediare, per ogni singolo *lead time*, i 10 membri associati a esso, e ottenere un campo di riflettività medio che costituisca la previsione deterministica per quel singolo *lead time*. Da qui il nome della tecnica, letteralmente *media dei membri dell'insieme*.

Si sottolinea che ognuno dei campi di riflettività media, essendo generato a tavolino, non è frutto diretto di osservazioni, e per tale motivo costituisce un unicum frutto dell'operazione di media aritmetica. Inoltre, perché i primi 10 analoghi individuati dalle due linee di ricerca non siano correlati tra loro, falsando così la media dei membri dell'ensemble e, in

generale, l'ensemble stesso, si svolge nuovamente la ricerca degli analoghi con l'ulteriore vincolo di distanziamento di almeno un'ora tra due analoghi appartenenti al medesimo evento.

In FIGURA 8.10, con finalità esemplificativa, si riportano le 24 scansioni ottenute dalla media dei membri dell'ensemble (condotta da una routine all'interno di Pysteps) costituito dai primi 10 analoghi ottenuti seguendo la linea di ricerca *per frame*. Al loro fianco, le 24 scansioni che, temporalmente, seguono la *query*, in modo tale da poter operare un immediato confronto visivo tra le immagini. Il colpo d'occhio suggerisce colori più tendenti all'azzurro (e meno al verde) per i campi di riflettività mediati tra i membri dell'ensemble, indicando una sottostima dell'intensità di pioggia.

Per quantificare la bontà delle previsioni associate alla tecnica della media di *ensemble*, si grafica ancora una volta il FSS tra loro, e le osservazioni a seguito della *query*. Il diagramma, presentato in FIGURA 8.11, mostra un generale andamento delle curve del FSS decrescente, e ciò è giustificabile guardando alla FIGURA 8.10 e notando che l'aumento d'intensità di precipitazione che da un lato si ha nelle osservazioni, non viene rilevata nelle previsioni, la cui intensità resta circa la stessa per tutti e 24 i frame. Tuttavia, complessivamente, valori elevati di FSS dicono che si tratta di una buona previsione.

La stessa operazione di media tra i membri dell'ensemble può condursi con i 10 analoghi finali uscenti da una ricerca secondo la linea *per pixel*. Non riportando i 24 frame costituenti l'*ensemble mean*, ma limitandosi al grafico del FSS (consultabile in FIGURA 8.12), si può notare come i valori di FSS siano molto simili, anche se lievemente superiori, rispetto a quelli ottenuti in FIGURA 8.11 seguendo una linea di ricerca *per aree*. Tali valori si mantengono circa nell'intervallo tra 0.9 e 1.0 per tempi di previsione entro l'ora e mezza, per poi subire un calo piuttosto repentino nell'arco della mezz'ora finale.

Ciò che salta subito all'occhio – e che tuttavia costituisce un elemento meramente aleatorio – è la maggiore armonia presente all'interno di questo secondo diagramma, dovuta al minor numero di sbalzi improvvisi e al minor zig-zagare di sottofondo delle curve.

8.5 La previsione probabilistica

Come preannunciato, tramite il metodo degli analoghi si può generare non solo una previsione di tipo *deterministico*, secondo le due possibili vie

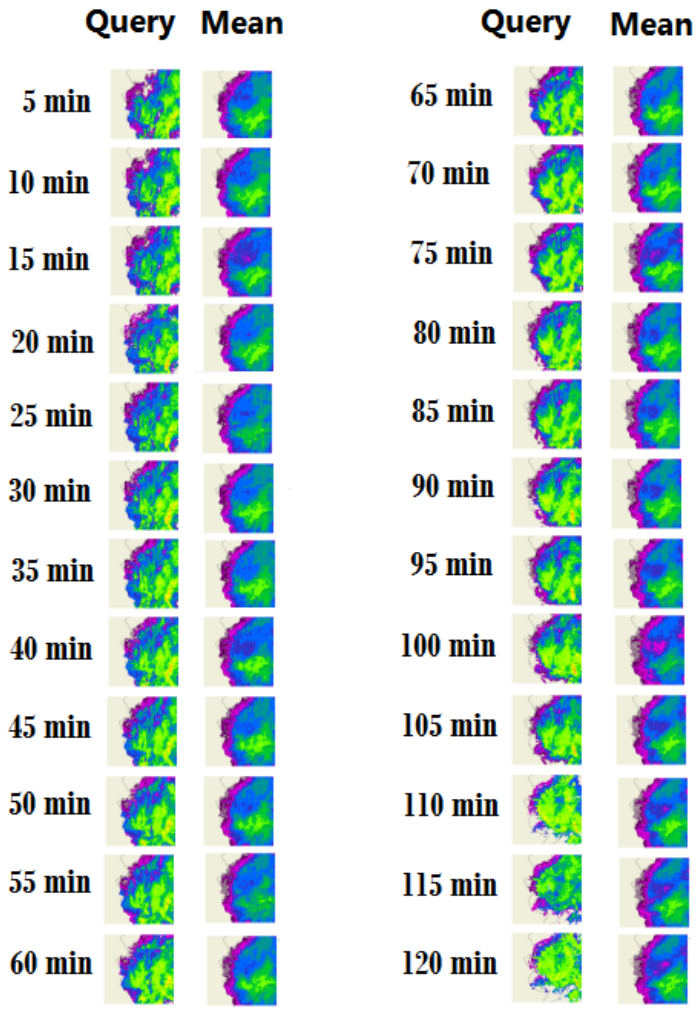


FIGURA 8.10: **Confronto tra query ed ensemble mean.** In figura vengono mostrate, in corrispondenza delle due colonne contrassegnate con il termine *mean*, le 24 immagini derivanti dall'operazione di media dei membri dell'ensemble costituito dai 10 migliori analoghi seguendo la linea di ricerca *per aree*. Nelle colonne contrassegnate con il termine *query*, invece, le 24 scansioni che seguono a ruota quella costituente la *query*.

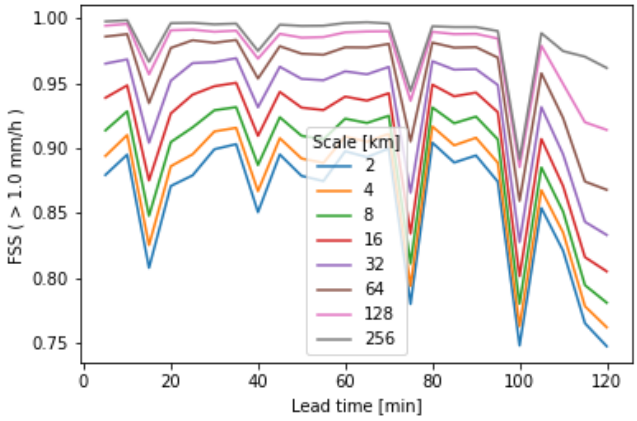


FIGURA 8.11: **FSS per previsioni tramite ensemble mean (aree).** In figura vengono presentate le curve relative al FSS, al variare della scala spaziale, nel caso di previsione deterministica per mezzo di campi di riflettività mediati tra i membri dell'ensemble contenente i 10 migliori analoghi prodotti dalla ricerca *per aree*. Ancora una volta, sbalzi bruschi nelle curve si devono ad anomalie nelle scansioni che fanno seguito agli analoghi, e che influiscono successivamente sulla media.

descritte nella sezione precedente, ma può altresì prodursi una previsione di tipo *probabilistico*.

Se, per un verso, la previsione *deterministica* condotta secondo il metodo del *primo analogo*, poiché coinvolge la scansione che, tra tutte quelle dell'archivio, presenta la maggiore somiglianza con la *query*, persegue la massimizzazione dell'analogia, d'altro canto essa genera un solo scenario futuro possibile, senza fornire alcuna misura d'incertezza ad esso associata. Ecco il motivo per cui alle previsioni *deterministiche* si affiancano, quando possibile, previsioni di tipo *probabilistico*.

Il metodo degli analoghi si presta in modo naturale a questa tipologia di previsione, in quanto classificare un intero archivio in base all'analogia con una *query* significa riordinarne le scansioni per somiglianza con un certo riferimento, e a quel punto è sufficiente estrarre non la sola scansione classificatasi prima, bensì un intero *gruppo di testa*, annoverabile come il gruppo contenente le scansioni radar maggiormente analoghe, e costituente il già citato *ensemble*. Nel processo di ricerca degli analoghi compiuto all'interno del NACO si è già pervenuti a un gruppo costituito dai migliori analoghi, i primi 10, e questo rappresenterà quel *gruppo di testa* che darà esito a una previsione di tipo probabilistico.

L'idea alla base di una previsione di questo tipo consiste nel definire

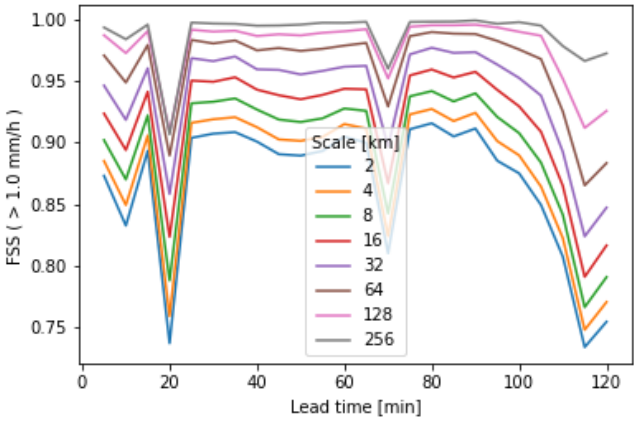


FIGURA 8.12: **FSS per previsioni tramite ensemble mean (pixel).** In figura vengono presentate le curve relative al FSS nel caso di previsione deterministica per mezzo di campi di riflettività mediati tra i membri dell'ensemble contenente i primi 10 analoghi uscenti, a differenza della FIGURA 8.11, dalla ricerca *per pixel*. Rispetto alla figura appena citata, si notano valori di FSS lievemente maggiori.

una soglia associata alla variabile misurata – nel caso di previsioni meteorologiche di nowcasting si tratterà di *riflettività* Z oppure di *intensità di precipitazione* R –, e di confrontare, per ogni singolo *lead time*, i pixel omologhi dei membri dell'ensemble, pixel per pixel, in modo tale da poter giungere, alla fine, a una percentuale di pixel con associato un valore oltre la soglia. Questa percentuale rappresenta una misura di probabilità fondata sui membri contenuti nell'ensemble. Più membri contiene l'ensemble, più ampio è il campione per il calcolo della probabilità, ma al contempo minore sarà l'analogia veicolata da essi.

Usando ancora una volta la linea di ricerca *per aree* per la generazione dei primi esempi, si conduce, sfruttando ancora una volta i moduli di Pysteps, una previsione di nowcasting di tipo probabilistico sulla base delle 24 scansioni che seguono ciascuno dei 10 migliori analoghi. Ognuno di loro disterà temporalmente dagli altri di almeno un'ora, avendo imposto anche in questo caso, come per la generazione della *ensemble mean*, il vincolo che riduce la correlazione tra gli analoghi.

In FIGURA 8.13 vengono mostrati i risultati della previsione probabilistica dopo una ricerca degli analoghi *per aree*. Confrontando i frame omologhi dei 10 membri dell'ensemble, si ottengono 24 stime probabilistiche dell'intensità di pioggia, ovvero 24 immagini mostranti la probabilità, punto per punto, di avere un'intensità di pioggia oltre una certa soglia per quello specifico *lead time*. In figura non si riportano tutte le 24 im-

magini costituenti la previsione, ma se ne riportano solamente due, quella dopo un'ora e quella dopo un'ora e tre quarti (si è evitato di coinvolgere le ultimissime osservazioni in quanto, come precedentemente sottolineato, risultano oberate da anomalie osservative dovute all'improvvisa mancanza di scansioni dal radar Settepani), in totale 4 immagini se si aggiungono le corrispondenti due osservazioni, utili per un confronto immediato.

Scegliendo una soglia d'intensità di pioggia pari a $R = 2.5\,\mathrm{mm/h}$, corrispondente a una precipitazione da lieve a moderata, si possono analizzare i risultati guardando alla barra cromatica relativa alle osservazioni radar. Un superamento della soglia vorrebbe dire colorazione dal verde prato in su, fino al rosso, passando per il giallo e per l'arancione. Con questa considerazione, un rapido confronto visivo mostra che le zone a probabilità massima, in rosso scuro, corrispondo quasi sempre a un pattern di pioggia colorato dal verde in su. Se invece si scende verso probabilità più ridotte, la corrispondenza con le osservazioni mostra un'intensità di pioggia calante. Può, perciò, dirsi che la previsione probabilistica fornita rispecchi piuttosto bene quanto osservato, mostrando qualità piuttosto simili tra la previsione con associato un anticipo di un'ora e quella associata a uno di un'ora e tre quarti.

É interessante mostrare il medesimo risultato anche per la linea di ricerca *per pixel*. Svolgendo ogni singola operazione analogamente, in FIGURA 8.14 vengono mostrati i risultati. Dal confronto con quelli in FIGURA 8.13, può immediatamente notarsi quanto più ampia sia la zona a probabilità massima, sintomo di membri dell'ensemble più concordi tra loro. Inoltre, si nota una minore variazione del colore, che piuttosto bruscamente passa dal rosso (probabilità massima) al bianco (probabilità minima). Questo comportamento è segno di forte accordo tra i 10 membri selezionati dal filone di ricerca *per aree*, accordo che invece risulta molto minore tra i membri generati dal filone di ricerca *per pixel*. In più, non solo l'accordo è maggiore, ma al contempo la previsione probabilistica risulta di ottima qualità, mostrando forte corrispondenza con le osservazioni.

Guardando, invece, a ciò che le previsioni probabilistiche non riescono a prevedere piuttosto che, come fatto finora, a quello che, previsto, presenta corrispondenza con le osservazioni, si nota ad esempio per il *lead time* a +1 h e 45 min una specifica zona, immediatamente sotto la regione Liguria, ad alta intensità di pioggia, marcata da colori dal giallo all'arancio. Nessuno dei due filoni di ricerca riesce a fornire una previsione probabilistica che preveda quella zona ad alta intensità piovosa, a cui restano associate

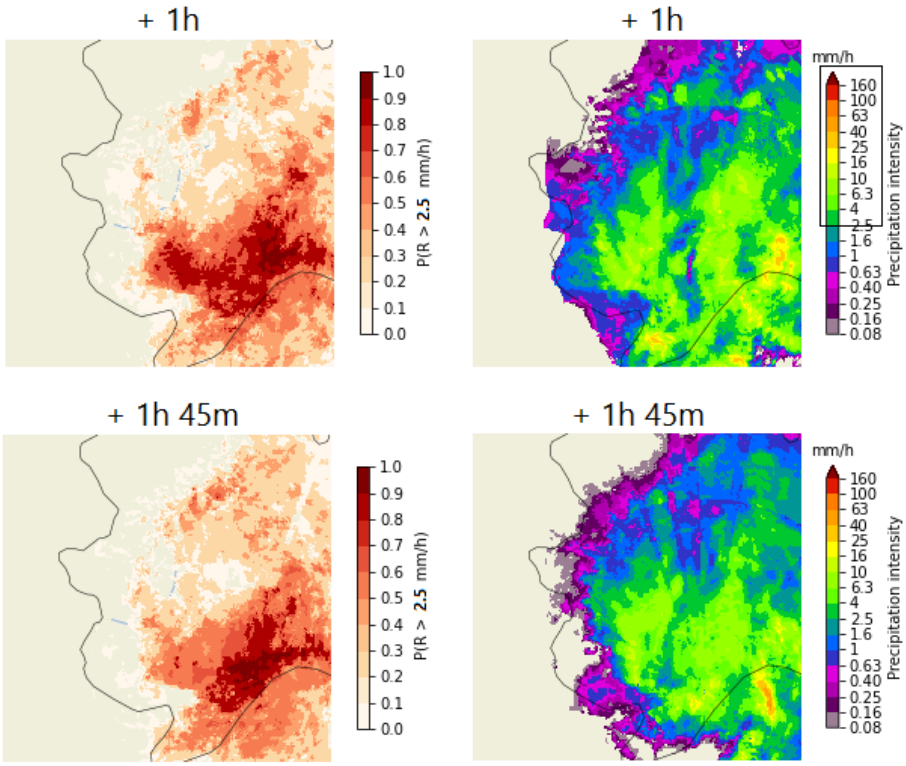


FIGURA 8.13: **La previsione probabilistica (aree).** In figura sono mostrate quattro immagini, ottenute mediante il tool Pysteps [89], mostranti a sinistra due previsioni probabilistiche a 1 h e a 1 h e 45 min, e a destra le corrispondenti osservazioni. Considerando che la soglia di $R = 2.5$ mm/h viene superata quando i colori del pattern di precipitazione (destra) vanno dal verde prato al rosso (si veda il riquadro in alto a destra che evidenzia la banda cromatica relativa al superamento della soglia), e considerando che dal canto suo la scala di probabilità va dal colore bianco (probabilità nulla) sino al rosso (probabilità massima), è possibile condurre un rapido confronto visivo tra previsione probabilistica, e osservazioni. Si nota che le zone a probabilità massima, in rosso scuro, corrispondono quasi sempre a zone del pattern radar dal verde al giallo, confermando la bontà di questo tipo di previsione.

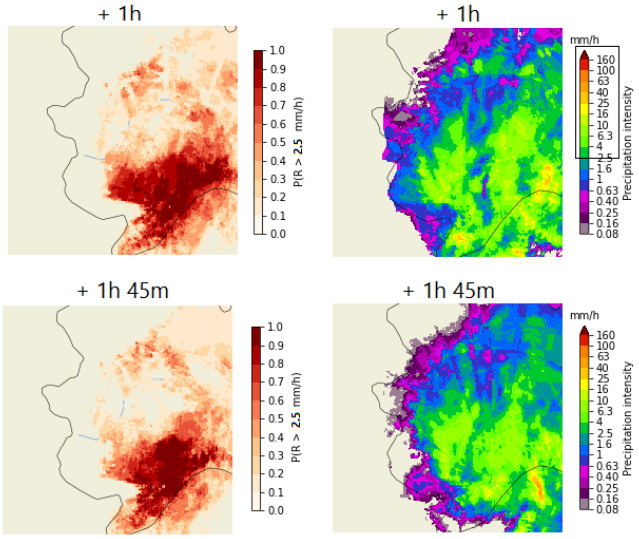


FIGURA 8.14: **La previsione probabilistica (pixel).** Figura analoga alla FIGURA 8.13, ma mostrante previsioni probabilistiche derivanti dalla ricerca degli analoghi *per pixel*. Si rimanda al corpo del testo per i dettagli.

basse probabilità d'incontrare pioggia poco più che lieve.

8.6 Il confronto con i metodi di estrapolazione

Condotte le analisi sui risultati del metodo NACO, si confrontano adesso le *skills* previsionali con quelle associate ai metodi di estrapolazione da immagini radar. Nel primo paragrafo si condurrà un'analisi sulla predicibilità dell'estrapolazione secondo la *persistenza Euleriana*, mentre nel successivo si analizzerà la bontà di un'estrapolazione mediante *persistenza Lagrangiana*. Ancora una volta sarà il FSS il metro di valutazione, rendendo così confrontabili i risultati tra metodi degli analoghi e metodo di estrapolazione.

8.6.1 La persistenza Euleriana

La prima tecnica di estrapolazione che si utilizza è anche la più semplice da mettere in atto. Basata sulla *persistenza Euleriana* (si veda la sezione *La Persistenza Euleriana* all'interno del capitolo *I metodi di estrapolazione*), questa tecnica di nowcasting fornisce, come previsione per le successive 2 - 3 h, uno stesso pattern radar: quello coincidente con la *query*. Si assume, cioè, che le caratteristiche di persistenza del campo di pioggia facciano

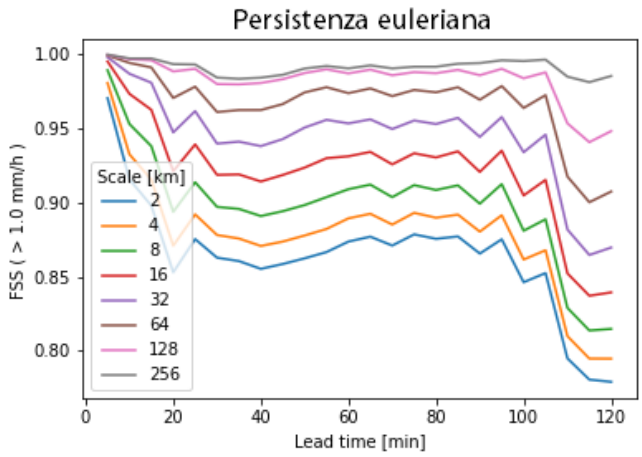


FIGURA 8.15: **Il FSS associato alla persistenza Euleriana.** In figura viene mostrato il FSS relativo a una previsione fondata sulla *persistenza Euleriana*. Oltre a notare caratteristiche comuni ai grafici del FSS associati al metodo degli analoghi, quali il zig-zag delle curve e la finale decrescita brusca dovuta alle anomalie osservative, si sottolinea l'assenza di brusche variazioni locali, dovute nel caso degli analoghi ad anomalie anche nelle scansioni analoghe, e l'ampia zona centrale in cui il valore del FSS tende a stazionare.

variare in piccola misura il pattern radar nel tempo, rendendo ottimale una previsione coincidente con l'osservazione corrente.

Testando questa tecnica sul caso in studio, si ottiene il grafico del FSS in FIGURA 8.15. Come si può notare da una prima occhiata, le diverse curve associate alle diverse dimensioni della *moving window* si originano, a +5 minuti dalla *query*, quasi da uno stesso punto (caso riservato ovviamente a +0 minuti dalla *query*), risultando molto vicine tra loro a differenza di quanto si è visto nei grafici relativi al metodo degli analoghi. Il motivo di ciò risiede nel fatto che, mentre con il metodo degli analoghi la previsione, sin dai +5 minuti, consisteva in *altre* osservazioni, prelevate da un altro evento meteorologico e affiancate alla *query*, nel caso della *persistenza Euleriana* la previsione *coincide* con la *query* stessa, ed è per questo motivo che il confronto tra *query* e osservazioni a essa successive ha una fortissima somiglianza all'inizio, quando si è vicini alla *query*, per poi perdere analogia nel tempo man mano che ci si allontana da essa.

Con lo scorrere del tempo, infatti, le diverse curve si distanziano progressivamente, segno di un progressivo allontanamento dalle osservazioni. Si nota, tuttavia, una zona centrale in cui le curve paiono stazionare, per poi giungere a una discesa piuttosto brusca vicino alle +2 h, motivata dalle anomalie nelle osservazioni, già lungamente discusse in precedenza.

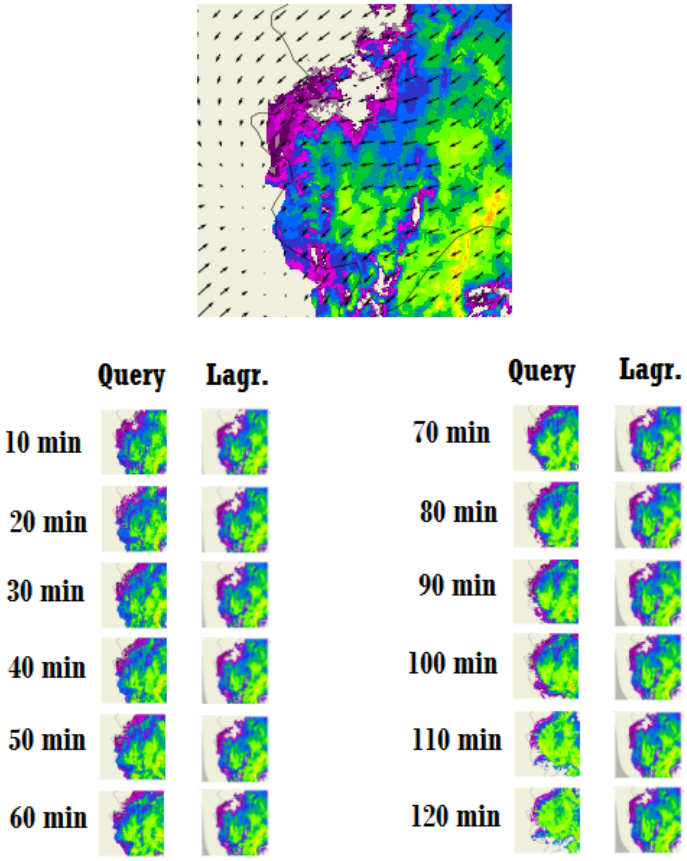


FIGURA 8.16: **L'estrapolazione Lagrangiana.** In figura, in alto viene mostrato il campo di avvezione associato alla *query* e generato dal VET, e in basso sono riportati i risultati del metodo di estrapolazione, confrontati con le osservazioni.

Si possono notare valori piuttosto elevati di FSS, compresi per lo più tra 0.85 e 1.0, segno che l'evento precipitativo scelto possiede notevoli caratteristiche di persistenza.

8.6.2 La persistenza Lagrangiana

Per generare una previsione basata sulla *persistenza Lagrangiana* (si veda la sezione *La Persistenza Lagrangiana* all'interno del capitolo *I metodi di estrapolazione*), si è fatto uso del tool Pysteps [89]. Nello specifico, tramite il modulo che produce un'estrapolazione basata sull'avvezione *semi-Lagrangiana all'indietro* (corrispondente allo schema di estrapolazione chiamato *semi-Lagrangian backward scheme* e descritto da Germann e Zawadzki [41]) del campo di riflettività della *query*, si è pervenuti ai 24

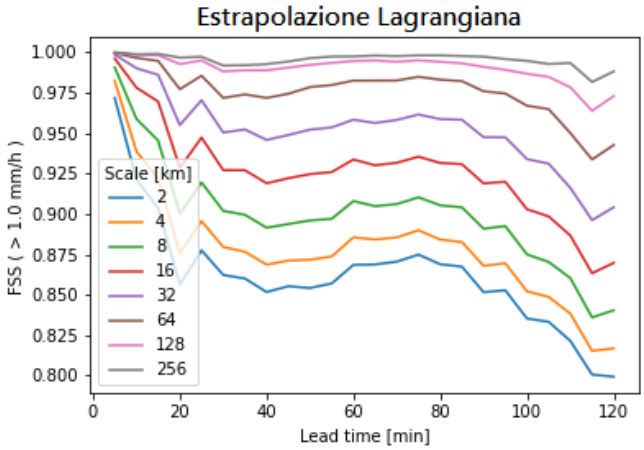


FIGURA 8.17: **Il FSS associato all'estrapolazione Lagrangiana.** In figura viene riportato il grafico del FSS associato alla previsione per estrapolazione Lagrangiana. Si nota un andamento delle curve quasi indistinguibile rispetto a quello delle curve del FSS associato alla *persistenza Euleriana*, con valori dell'indice ancora una volta piuttosto elevati.

campi di riflettività radar costituenti la previsione mediante estrapolazione Lagrangiana.

Il campo di velocità associato alla *query*, e necessario per l'implementazione del metodo, è stato calcolato con la tecnica del *Variational Echo Tracking* (VET), descritta nel paragrafo *L'algoritmo VET* all'interno del capitolo *Il calcolo del campo di avvezione*, e implementata ancora una volta dalle routine di Pysteps. Per il suo calcolo si sono utilizzate tre scansioni radar: non solo la *query*, associata al tempo t_0, e la scansione precedente, al tempo $(t_0 - \Delta t)$, ma anche la scansione ancora prima, al tempo $(t_0 - 2\Delta t)$.

Il risultato, in termini di *campo di avvezione* ottenuto dall'applicazione della tecnica VET e in termini di campi di pioggia previsti dal metodo, è mostrato in FIGURA 8.16. Per motivi di spazio, non si sono mostrate tutte le 24 immagini ottenute, bensì la metà, ogni 10 minuti invece che ogni 5. Da un lato, le scansioni osservate dopo la *query*, dall'altro i campi di pioggia generati dal metodo. In alto, il campo di avvezione associato alla *query* e prodotto dall'applicazione dell'algoritmo VET.

Anche se in piccolo, può notarsi che l'avvezione della *query* secondo quello specifico campo di velocità porta la zona a sud-ovest della scansione a spostarsi verso nord-est, producendo un bordo grigio sempre più marcato all'interno delle immagini, dovuto all'assenza di dati a seguito dell'avvezione. Invece, l'avvezione della zona a est non presenta questo problema, in quanto da quel lato c'è disponibilità di dati. Ciò è dovuto al posiziona-

mento dell'area geografica scelta per le analisi, corrispondente alla *Regione 3* (si veda la sezione *La scelta delle regioni* all'interno del capitolo *NACO – I dati radar*) e lambente, sul solo lato sinistro dell'area, i confini dell'*Area B*, oltre i quali non si dispone di dati.

In FIGURA 8.17, invece, vengono mostrate le misure sulla qualità previsionale del metodo di estrapolazione Lagrangiana appena utilizzato, ancora una volta in termini di FSS. Si nota un andamento delle curve estremamente simile a quello ottenuto per la *persistenza Euleriana*, presentando valori del FSS nuovamente compresi tra 0.85 e 1.0. Una differenza più evidente consiste nella decrescita finale delle curve, meno brusca rispetto a quella in FIGURA 8.15.

In definitiva, i metodi basati sulla persistenza, da un lato *Euleriana* e dall'altro *Lagrangiana*, vantano *skill* previsionali non indifferenti per l'evento relativo alla *query* selezionata, almeno guardando a un orizzonte previsionale che si ferma alle 2 ore di anticipo. Con il metodo NACO, come si è riportato, si sono trovati analoghi in grado di fornire *skill* ancora maggiori, ma al contempo altri analoghi hanno prodotto previsioni con *skill* leggermente inferiori.

Capitolo 9

Conclusioni

Nell'ambito di questo lavoro di tesi, contraddistinto da un'ampia parte di programmazione in linguaggio Python per lo sviluppo di algoritmi che acquisissero, gestissero ed elaborassero i dati radar a disposizione, si è concepita e testata una metodologia di previsione a brevissimo termine fondata sul concetto di *analogia*: la metodologia NACO. Dopo una prima parte volta a esplorare lo stato dell'arte nel campo delle previsioni meteorologiche di tipologia *nowcasting*, la messa a punto di una procedura per la ricerca degli analoghi ha avuto come seguito la generazione di previsioni, tanto di tipo deterministico quanto di tipo probabilistico, basate sull'esistenza di analogia tra il campo di precipitazione corrente e i campi osservati nel passato.

L'analisi della qualità previsionale associata alla metodologia sviluppata ha portato risultati di diversa natura: da un lato, si è visto che quella che viene individuata dalla procedura come scansione maggiormente analoga può, tuttavia, presentare abilità di previsione inferiori rispetto a quelle associate ad analoghi classificatisi dopo di lei. Il motivo di ciò risiede tanto nell'imprevedibilità associata all'evoluzione atmosferica, quanto nelle limitazioni del metodo nel cercare di prevederla. Infatti, per pensare di anticipare i movimenti futuri del campo di pioggia non è sufficiente disporre di un unico vettore rappresentativo del moto avvettivo medio del campo di riflettività – costituente, tuttavia, l'unica possibilità per motivi di elevato costo computazionale nel caso di stime del moto più sofisticate. Inoltre, la seconda classificazione operata proprio sulla base del moto medio avvettivo va a sconvolgere l'ordine precedente basato sulla somiglianza della distribuzione spaziale, e per tale motivo può capitare d'imbattersi in previsioni casualmente migliori in corrispondenza di analoghi classificati non primi.

L'impossibilità di confidare appieno nel primo analogo rende poco degna di fiducia una previsione deterministica basata esclusivamente su di lui. Per tale motivo, una possibilità risiede in una previsione comunque deterministica, ma basata su tutti e dieci gli analoghi del gruppo di testa. Con questa tecnica di *ensemble mean* si tiene conto contemporaneamente del futuro associato ai 10 migliori analoghi, senza sceglierne uno nello specifico, e così senza ricadere nel dubbio di aver optato per un analogo poco prestante. Analizzando questo tipo di previsione mediante il FSS, si ottengono qualità previsionali buone.

Se, in più, vuole ottenersi una misura dell'incertezza associata alla previsione, disponendo già di un ensemble è immediata la generazione di una previsione di tipo probabilistico. Anche in questo caso, l'utilizzo contemporaneo di 10 scenari futuri per la generazione della previsione riesce a smussare i difetti dovuti al singolo scenario, e al contempo fornisce una misura di probabilità relativa al superamento di una certa soglia di intensità di pioggia nei diversi punti dello spazio.

A differenza dei metodi d'estrapolazione, quindi, quelli per analoghi si prestano volentieri e molto spontaneamente alla previsione probabilistica, in quanto una classifica permette di attingere contemporaneamente agli scenari valutati più probabili degli altri. I metodi d'estrapolazione, a meno d'inventarsi procedure per ottenere misure d'incertezza, non riescono invece ad essere così facilmente utilizzabili per previsioni di tipo probabilistico, e ciò costituisce un loro grosso limite.

Quanto al confronto tra la previsione deterministica generata dalle tecniche estrapolative e quella generata dagli analoghi, il FSS mostra, almeno per il caso studio analizzato, valori associati al metodo NACO inferiori o superiori a quelli associati alle tecniche estrapolative a seconda dell'analogo selezionato. In più, si è notato che le previsioni associate ad alcuni analoghi vedono addirittura una crescita delle prestazioni nel tempo, e ciò è riconducibile tanto a una componente di casualità, quanto al fatto che si sia attinto da osservazioni e non da elaborazioni computazionali per generare la previsione, motivo per cui una certa ripetibilità nei fenomeni precipitativi e nelle loro evoluzioni può, se individuata, condurre a previsioni che non peggiorano con lo scorrere dei minuti.

Non essendo riusciti a condurre, per motivi di tempo (tanto fisico quanto computazionale), tutte le analisi che si erano ipotizzate potenzialmente interessanti, esistono tanti possibili sviluppi ulteriori dello studio condotto all'interno di questo lavoro di tesi, di seguito elencati:

1. Misurare le abilità previsionali del metodo mediante uno *score* dif-

ferente dal FSS, oppure con lo stesso FSS ma utilizzando una soglia d'intensità di pioggia superiore a 1 mm/h;

2. Migliorare l'algoritmo di ricerca degli analoghi utilizzando – a patto di disporre di elaboratori elettronici più veloci – una stima del campo di avvezione più sofisticata;

3. Migliorare l'algoritmo di ricerca degli analoghi non utilizzando il campo di avvezione istantaneo per avere una stima del movimento del pattern di riflettività, bensì tracciando l'evoluzione temporale di certe caratteristiche all'interno delle scansioni che precedono il potenziale analogo, e fondando la seconda scrematura sulla somiglianza di evoluzioni di questo tipo;

4. Analizzare l'applicabilità del metodo su zone a orografia non complessa;

5. Modificare la regione su cui condurre le analisi di predicibilità del metodo;

6. Ridurre randomicamente l'archivio storico al fine di valutare quanto le prestazioni del metodo varino;

7. Analizzare l'applicabilità del metodo per eventi di tipo convettivo oppure stratiforme.

Per concludere, come sottolineano Panziera *et al.* [84], il metodo degli analoghi qui sviluppato tenta di sfruttare la ripetibilità dei pattern atmosferici e piovosi dovuti al *forcing orografico* per migliorare la qualità del nowcasting percorrendo la via dell'analogia. *Analogamente*, un qualsiasi fenomeno che presenti un certo *forcing* esterno producente una certa ripetibilità può essere anticipato percorrendo la medesima via. Tutto sta nel dimostrare che quel forcing produca effettivamente *ripetibilità* nelle variabili, meteorologiche o no, che s'intende prevedere.

Il metodo degli analoghi applicato al caso della precipitazione, dal canto suo, ha dimostrato, con questo studio e con i tanti studi passati, che la ripetibilità, se esistente, genera predicibilità mediante un metodo fondato sugli analoghi.

Elenco delle figure

1.1 Carta sinottica con sole isobare 16
1.2 Carta sinottica con isobare e fronti 18
1.3 La fabbrica delle previsioni di Richardson 22
1.4 Griglia numerica di Richardson 23
1.5 Qualità delle previsioni numeriche negli anni 28

2.1 Andamento annuale della Temperatura 44
2.2 Orbite nello spazio delle fasi 46
2.3 FSLE di un sistema dinamico accoppiato 50

3.1 *Assimilation window* e *forecast period* 69
3.2 Vettori spostamento nello schema semi-Lagrangiano 73
3.3 Schemi d'avvezione *forward* e *backward* 75
3.4 Avvezione *a vettori costanti* e *semi-Lagrangiana* 76
3.5 Distribuzione gaussiana bidimensionale 78
3.6 Predicibilità dei metodi di persistenza 80
3.7 *Growth & Decay* su orografia complessa 87

4.1 Esempio di flusso ottico 94
4.2 Esempio di *optical flow* 94
4.3 Vettore velocità e vettore ∇I nel flusso ottico 97
4.4 Il problema dell'apertura con un foro 98
4.5 Il problema dell'apertura con quattro fori 99
4.6 Asta in moto e problema dell'apertura 99
4.7 Schema dell'algoritmo TREC 104
4.8 Campi di moto da VET 108

5.1 Interazione del flusso con l'orografia 113
5.2 Meccanismi portanti a pioggia orografica 115

6.1 Selva di relazioni Z-R 129

6.2 Alcune fonti d'incertezza nelle stime da radar 137
6.3 Elevazioni del fascio del radar Bric della Croce 138
6.4 Copertura dei radar Bric della Croce e Monte Settepani . . 140
6.5 Maschera di visibilità dei due radar 142
6.6 Visibilità del fascio con georeferenziazione 143
6.7 Area geografica A 144
6.8 Copertura del radar Bric della Croce nell'Area A 147
6.9 Area geografica B 153
6.10 Esempio di evento a carattere convettivo 157
6.11 Esempio di evento a carattere stratiforme 158
6.12 Procedura di upscaling 161
6.13 Orografia della regione Piemonte 163
6.14 La prima regione scelta 164
6.15 Esempio di ricerca per analoghi sulla prima regione 165
6.16 La seconda regione scelta 166
6.17 La terza regione scelta 167

7.1 Rappresentazione del WAR 178
7.2 Analoghi spaziali con il criterio dell'area bagnata 179
7.3 Upscaling nel criterio per aree 180
7.4 Analoghi spaziali con il criterio per aree 181
7.5 Differenza tra criterio per aree e per pixel 183
7.6 Analoghi spaziali con il criterio per pixel 184

8.1 La query selezionata 190
8.2 Primi 30 analoghi secondo il criterio per aree 192
8.3 Primi 30 analoghi secondo il criterio per pixel 194
8.4 Confronto del futuro tra query e primo analogo 196
8.5 FSS nel tempo tra query e primo analogo (aree) 198
8.6 FSS nel tempo tra query spostata e primo analogo 199
8.7 FSS nel tempo tra query e primo analogo (pixel) 201
8.8 FSS nel tempo tra query e alcuni analoghi finali (pixel) . . 202
8.9 Anomalie diffuse nell'andamento del FSS 203
8.10 Confronto tra query ed ensemble mean 205
8.11 FSS per previsioni tramite ensemble mean (aree) 206
8.12 FSS per previsioni tramite ensemble mean (pixel) 207
8.13 La previsione probabilistica (aree) 209
8.14 La previsione probabilistica (pixel) 210
8.15 Il FSS associato alla persistenza Euleriana 211
8.16 L'estrapolazione Lagrangiana 212

8.17 Il FSS associato all'estrapolazione Lagrangiana 213

Elenco delle tabelle

1.1 Scale spazio-temporali dei fenomeni atmosferici 25

6.1 Bande associate al campo delle microonde 125
6.2 Eventi 1–19 146
6.3 Caratteristiche dell'Area A 147
6.4 Eventi 20–33 149
6.5 Eventi 34–38 150
6.6 Eventi 39–58 151
6.7 Eventi 59–81 152
6.8 Caratteristiche dell'Area B 154
6.9 Gli eventi all'interno delle aree A e B 155

Bibliografia

[1] Alfieri, Lorenzo (2008), "Statistical and physical properties of precipitation and implications for flood risk assessment", *PhD in Hydraulic Engineering*, Dissertation, Politecnico di Torino.

[2] Alfieri, L., Claps, P., Laio, F., (2010), "Time-dependent Z-R relationships for estimating rainfall fields from radar measurements", *Natural Hazards and Earth System Sciences* **10**, pagg. 149-158.

[3] Alpert, Pipistrel (1986), "Mesoscale indexing of the distribution of orographic precipitation over high mountains", *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **25**, pagg. 532–545.

[4] Atencia, A., Zawadzki, I. (2014), "A comparison of two techniques for generating nowcasting ensembles. Part I: Lagrangian ensemble technique", *Monthly Weather Review* **142**, pagg. 4036–4052.

[5] Atencia, A., Zawadzki, I. (2015), "A comparison of two techniques for generating nowcasting ensembles. Part II: Analogs Selection and Comparison of Techniques", *Monthly Weather Review* **143**, pagg. 2890-2908.

[6] Aurell, E., Boffetta, G., Cristanti, A., Paladin, G., Vulpiani, A. (1996), "Growth of noninfinitesimal perturbations in turbulence", *Physical Review Letters* **77**.

[7] Austin, G. L., Bellon, A. (1974), "The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **100**, pagg. 658–664.

[8] Ayzel, G., Heistermann, M., Winterrath, T. (2019), "Optical flow models as an open benchmark for radar-based precipitation nowcasting (rainymotion v0.1)", *Geoscientific Model Development* **12**, pagg. 1387–1402.

[9] Battan, L. J. (1973), *Radar observation of the atmosphere*, Chicago Press, Chicago.

[10] Beauchemin, S. S., Barron, J. L. (1995), "The computation of optical flow", *ACM Computing Surveys* **27**, pagg. 433-466.

[11] Bechini, R., Cremonini, R. (2002), "The weather radar system of north-western Italy: an advanced tool for meteorological surveillance", *Proceedings of ERAD 2002*, pagg. 400-404.

[12] Bellon, A., Zawadzki, I. (1994), "Forecasting of hourly accumulations of precipitation by optimal extrapolation of radar maps", *Journal of Hydrology* **157**, pagg. 211–233.

[13] Bellon, A., Zawadzki, I., Kilambi, A., Lee, H. C., Lee, Y. H., Lee, G. (2010), "McGill Algorithm for Precipitation nowcasting by Lagrangian Extrapolation (MAPLE) applied to the South Korean radar network. Part I: sensitivity studies of the Variational Echo Tracking (VET) technique", *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **46**, pagg. 369-381.

[14] Berenguer, M., Sempere-Torres, D., Pegram, G. G. (2011), "SBMcast: An ensemble nowcasting technique to assess the uncertainty in rainfall forecasts by Lagrangian extrapolation", *Journal of Hydrology* **404**, pagg. 226–240.

[15] Bjerknes, Vilhelm (1904), "The problem of weather prediction considered from the point of view of Mechanics and Physics", *Meteorologische Zeitschrift* **21**, pagg. 1-7.

[16] Bobick, Aaron (2009), *CS 4495 Computer Vision: Motion and Optic Flow*, School of Interactive Computing.

[17] Boffetta, G., Cristanti, A., Paparella, F., Provenzale, A., Vulpiani, A. (1998), "Slow and fast dynamics in coupled systems: a time series analysis view", *Physica D* **116**.

[18] Bouvard, Alexis (1821), *Tables astronomiques publiées par le Bureau des Longitudes de France*, Paris, Bachelier.

[19] Bowler, N. E., Pierce, C. E., Seed, A. (2004), "Development of a precipitation nowcasting algorithm based upon optical flow techniques", *Journal of Hydrology* **288**, pagg. 74-91.

[20] Bowler, N. E., Pierce, C. E., Seed, A. (2006), "STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **132**, pagg. 2127–2155.

[21] Browning, K. A., Collier, C. G., Larke, P. R., Menmuir, P., Monk, G. A., Owens, R. G. (1982), "On the forecasting of frontal rain using a weather radar network", *Monthly Weather Review* **110**, pagg. 534–552.

[22] Charney, J. G., Fjørtoft, R. , von Neumann, J. (1950), "Numerical integration of the barotropic vorticity equation", *Tellus* **2**, pagg. 237-254.

[23] Claps, P., Laio, F., Allamano, P., Gallo, E., Masoero, A., Barbero, S., Cremonini, R., Bechini, R. (2012), "Stima dei campi di precipitazione da radar mediante validazione con dati provenienti dalla rete pluviometrica" in *FLORA, la difesa dalle alluvioni nel territorio alpino*, ARPA Piemonte.

[24] Collier, Christopher G. (1989), *Applications of Weather Radar Systems: A Guide to Uses of Radar Data in Meteorology and Hydrology*, Halsted Press.

[25] Cushman-Roisin, B., Beckers, J. M. (2009), *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics. Physical and Numerical Aspects*, Academic Press.

[26] Dalakov, Georgi (2017), "History of Computers, Hardware, Software, and Internet", sito web *History of Computers*.
`https://history-computer.com/`
Ultimo accesso: Maggio 2021.

[27] Diomede, T., Nerozzi, F., Paccagnella, T., Todini, E. (2008), "The use of meteorological analogues to account for LAM QPF uncertainty", *Hydrology and Earth System Sciences* **12**, pagg. 141–157.

[28] Dixon, M., Wiener, G. (1993), "TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting: a radar-based methodology", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **10**, pagg. 785–797.

[29] Ehrendorfer, Martin (1994), "The Liouville equation and its potential usefulness for the prediction of forecast skill. Part I: Theory", *Monthly Weather Review* **122**, pagg. 703-713.

[30] Enciclopedia Treccani, *Predicibilità*, Istituto dell'Enciclopedia Italiana.
`https://www.treccani.it/enciclopedia/predicibilita`
Ultimo accesso: Maggio 2021.

[31] Fabry, F., Seed, A. (2009), "Quantifying and predicting the accuracy of radar-based quantitative precipitation forecasts", *Advances in Water Resources* **32**, pagg. 1043–1049.

[32] Foresti, L., Panziera, L., Mandapaka, P. V., Germann, U., Seed, A. (2013), "Retrieval of analogue radar images for ensemble nowcasting of orographic rainfall", *Meteorological Applications* **22**, pagg. 141-155.

[33] Foresti, L., Panziera, L., Mandapaka, P. V., Pozdnoukhov, A. (2011), "Nowcasting by analogues: a generalization using radar data sequences", *35th Conference on Radar Meteorology*, Pittsburgh.

[34] Foresti, L., Panziera, L., Mandapaka, P. V., Seed, A. (2012), "Nowcasting of orographic rainfall by means of radar data sequences: limits of predictability", *ERAD 2012–The 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, Toulouse.

[35] Foresti, L., Pozdnoukhov, A. (2011), "Exploration of Alpine orographic precipitation patterns with radar image processing and clustering techniques", *Meteorological Applications* **19**, pagg. 407-419.

[36] Foresti, L., Reyniers, M., Seed, A., Delobbe, L. (2016), "Development and verification of a real-time stochastic precipitation nowcasting system for urban hydrology in Belgium", *Hydrology and Earth System Sciences* **20**, pagg. 505–527.

[37] Foresti, L., Seed, A. (2015), "On the spatial distribution of rainfall nowcasting errors due to orographic forcing", *Journal of Applied Meteorology* **22**, pagg. 60–74.

[38] Foresti, L., Sideris, I. V., Nerini, D., Beusch, L., Germann, U. (2019), "Using a 10-Year Radar Archive for Nowcasting Precipitation Growth and Decay: A Probabilistic Machine Learning Approach", *Weather and Forecasting* **34**, pagg. 1547-1569.

[39] Foresti, L., Sideris, I., Panziera, L., Nerini, D., Germann, U. (2018), "10-year radar-based analysis of orographic precipitation growth and

decay patterns over the Swiss Alpine region", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **144**, pagg. 2277–2301.

[40] Germann, U., Berenguer, M., Sempere-Torres, D., Zappa, M. (2009), "REAL–Ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **135**, pagg. 445–456.

[41] Germann, U., Zawadzki, I. (2002), "Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology", *Monthly Weather Review* **130**, pagg. 2859–2873.

[42] Germann, U., Zawadzki, I., Turner, B. (2006), "Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part IV: Limits to Prediction", *Journal of the Athmospheric Sciences* **63**, pagg. 2092-2108.

[43] Gibson, James Jerome (1950), *The Perception of the Visual World*, Houghton Mifflin.

[44] Giuffrida, A., Sansosti, G. (1978), *Manuale di meteorologia. Una guida alla comprensione dei fenomeni atmosferici e climatici*, Gremese Editore.

[45] Giuliacci, A., Giuliacci, M., Corazzon, P. (2010), *Manuale di meteorologia*, Alpha Test.

[46] Glossary of Meteorology, *Advection*, American Meteorological Society.
`https://glossary.ametsoc.org/wiki/Advection`
Ultimo accesso: Giugno 2021.

[47] Grecu, M., Krajewski, W. (2000), "A large-sample investigation of statistical procedures for radar-based short-term quantitative precipitation forecasting", *Journal of Hydrology* **239**, pagg. 69–84.

[48] Guckenheimer, J., Holmes, P. (1983), *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcation of Vector Fields*, Springer-Verlag, Heidelberg.

[49] Higgs, Peter (2007), "Prehistory of the Higgs boson", *Comptes Rendus Physique* **8**, pagg. 970-972.

[50] Hilst, G. R., Russo, J. A. (1960), "An objective extrapolation technique for semi-conservative fields with an application to radar patterns", *Technical Memorandum* n. **3**. The Travelers Weather Research Center.

[51] Horn, B. K., Schunck, B. G. (1981), "Determining optical flow", *Artificial Intelligence* **17**, pagg. 185–203.

[52] Hyndman, R. J., Athanasopoulos, G. (2018), *Forecasting: principles and practice*, 2nd edition, OTexts, Melbourne, Australia.

[53] Johnson, J. T., MacKeen, P. L., Witt, A. E., Mitchell, D., Stumpf, G. J., Eilts, M. D., Thomas, K. W. (1998), "The Storm Cell Identification and Tracking algorithm: an enhanced WSR88D algorithm", *Weather and Forecasting* **13**, pagg. 263–276.

[54] Joss, J., Waldvogel, A. (1970), "A method to improve the accuracy of radarmeasured amounts of precipitation", Preprints, *14th Radar Meteorology Conference*, American Meteorological Society, Tucson.

[55] Kessler, Edwin (1969), *On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations*, *Meteorological Monographs* **10**.

[56] Kuo, Y. H., Chen, G. T. (1990), "The Taiwan Area Mesoscale Experiment (TAMEX): an overview", *Bulletin of the American Meteorological Society* **71**, pagg. 488–503.

[57] Laroche, S., Zawadzki, I. (1994), "A variational analysis method for retrieval of three-dimensional wind field from single-Doppler radar data", *Journal of the Atmospheric Sciences* **51**, pagg. 2664–2682.

[58] Laroche, S., Zawadzki, I. (1995), "Retrievals of horizontal winds from single-Doppler clear-air data by methods of cross correlation and variational analysis", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **12**, pagg. 721–738.

[59] Li, L., He, Z., Chen, S., Mai, X., Zhang, A., Li, Z., Tong, X. (2018), "Subpixel-Based Precipitation Nowcasting with the Pyramid Lucas–Kanade Optical Flow Technique", *Atmosphere* **9**, pagg. 1-22.

[60] Li, L., Schmid, W., Joss, J. (1995), "Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography", *Journal of Applied Meteorology* **34**, pagg. 1286–1300.

[61] Libertino, Andrea (2013), "Uso combinato di radar meteorologico e misure a terra per la stima in tempo reale della pioggia areale", *Tesi di Laurea Magistrale*, Politecnico di Torino.

[62] Lorenz, Edward Norton (1963), "Deterministic Nonperiodic flow", *Journal of the Athmospheric Sciences* **20**, pagg. 130–141.

[63] Lorenz, Edward Norton (1969), "Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues", *Journal of the Athmospheric Sciences* **26**, pagg. 636–647.

[64] Lorenz, Edward Norton (1973), "On the existence of extended range predictability", *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **12**, pagg. 543-546.

[65] Lorenz, Edward Norton (1996), "Predictability: A problem partly solved", *Proceedings of the ECMWF Seminar on Predictability* **1**, Reading, Berkshire, United Kingdom, pagg. 1-18.

[66] Lucas, B. D., Kanade, T. (1981), "An iterative image Registration Technique with an Application to Stereo Vision", in *Proceedings DARPA Image Understanding Workshop*, Vancouver, BC, Canada.

[67] Lucas, B. D., Kanade, T. (1981), "An iterative technique of image registration and its application to stereo", in *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial intelligence – Volume II*, pagg. 674-679.

[68] Lynch, Peter (2006), *The Emergence of Numerical Weather Prediction: Richardson's Dream*, Cambridge University Press, Cambridge.

[69] Marshall, J. S., Palmer, W. M. K. (1948), "The distribution of raindrops with size", *Journal of Applied Meteorology* **5**, pagg. 165-166.

[70] McDermott, J., Adelson, E. H. (2004), "Motion Perception and Mid-Level Vision", in *The cognitive neurosciences III*, pagg. 369-383. MIT Press, Cambridge.

[71] Mecklenburg, S., Joss, J., Schmid, W. (2000), "Improving the nowcasting of precipitation in an Alpine region with an enhanced radar echo tracking algorithm", *Journal of Hydrology* **239**, pagg. 46–68.

[72] Mohri, T., Nakamura, M., Tanaka, H. (1994), "Weather Forecasting Using Memory-Based Reasoning", *Machine Intelligence and Pattern Recognition* **15**, pagg. 185-197.

[73] Murakami, Ikuya (2004), "The aperture problem in egocentric motion", *Trends in neurosciences* **27**, pagg. 174-177.

[74] Nagel, Hans-Hellmut (1992), "Direct estimation of optical flow and of its derivatives", in *Artificial and biological vision systems*, G. A. Orban, Springer, pagg. 193-224.

[75] National Weather Service, *A Review of Local Weather in 2005*, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).
`https://www.weather.gov/tae/climate_2005review`
Ultimo accesso: Maggio 2021.

[76] Navon, I. M., Leger, D. M. (1987), "Conjugate-gradient method for large-scale minimization in meteorology", *Monthly Weather Review* **115**, pagg. 1479–1502.

[77] Obled, C., Bontron, G., Garcon, R. (2002), "Quantitative precipitation forecasts: A statistical adaptation of model outputs through an analogues sorting approach", *Atmospheric Research* **63**, pagg. 303–324.

[78] Orlandini, Simone (2018), "Le previsioni meteorologiche: capirle per meglio utilizzarle", sito web *Toscana Medica*.
`https://www.toscanamedica.org/`
Ultimo accesso: Maggio 2021.

[79] Otsuka, K., Horikoshi, T., Kojima, H., Suzuki, S. (2000), "Image sequence retrieval for forecasting weather radar echo pattern", *IEICE Transactions on Information and Systems* **E83**, pagg. 1458–1465.

[80] Ott, Edward (2002), *Chaos in Dynamical Systems*, Cambridge University Press.

[81] Palmer, Timothy Noel (2002), "Predicting uncertainty in numerical weather forecasts", *International Geophysics* **83**, in *Meteorology at the Millennium*, pagg. 3-13.

[82] Palmroth, M., Ganse, U., Pfau-Kempf, Y., Battarbee, M., Hoilijoki, S., Turc, L., Sandroos, A., Brito, T., von Alfthan, S., Grandin, M. (2018),

"Vlasov methods in space physics and astrophysics", *Living Reviews in Computational Astrophysics* **4**, pagg. 1-55.

[83] Panziera, L., Germann, U. (2010), "The relation between airflow and orographic precipitation on the southern side of the Alps as revealed by weather radar", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **136**, pagg. 222–238.

[84] Panziera, L., Germann, U., Gabella, M., Mandapaka, P. (2011), "NORA–Nowcasting of orographic rainfall by means of analogs", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **137**, pagg. 2106–2123.

[85] Paparella, Francesco (2003), "Predicibilità, Impredicibilità e Modelli nelle Scienze Naturali", Convegno Nazionale *Matematica senza Frontiere*, pagg. 325-332.

[86] Peura, M., Hohti, H. (2004), "Optical Flow in Radar Images", *ERAD 2004*, pagg. 454-458

[87] Picco, Barbara (2006), "Analisi della correlazione tra misure pluviometriche e radar-meteorologiche per differenti tipologie di evento", *Tesi di Laurea Magistrale*, Politecnico di Torino.

[88] Pinna, M., Serra, A. (1978), *L'atmosfera e il clima. L'analisi e la previsione del tempo*, UTET, Torino.

[89] Pulkkinen, S., Nerini, D., Perez Hortal, A., Velasco-Forero, C., Germann, U., Seed, A., Foresti, L. (2019), "Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1.0)", *Geoscientific Model Development* **12**, pagg. 4185–4219.

[90] Radhakrishna, B., Zawadzki, I., Fabry, F. (2012), "Predictability of precipitation from continental radar images. Part V: Growth and decay", *Journal of the Atmospheric Sciences* **69**, pagg. 3336–3349.

[91] Reyniers, Maarten (2008), "Quantitative Precipitation Forecasts based on radar observations: principles, algorithms and operational systems", *Royal Meteorological Institute of Belgium* **52**.

[92] Richardson, Lewis Fry (1922), *Weather Prediction by Numerical Processes*, Cambridge University Press, Boston.

[93] Rinehart, R. E., Garvey, E. T. (1978), "Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar", *Nature* **273**, pagg. 287–289.

[94] Ringler, Todd (2011), "Momentum, vorticity and transport: Considerations in the design of a finite-volume dynamical core", in *Numerical techniques for global atmospheric models*, chapter **7**. Springer.

[95] Robert, André (1981), "A stable numerical integration scheme for the primitive meteorological equations", *Atmosphere-Ocean* **19**, pagg. 35–46.

[96] Roe, Gerard H. (2005), "Orographic precipitation", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **33**, pagg. 645–671.

[97] Root, B., Knight, P., Young, G., Greybush, S., Grumm, R., Holmes, R., Ross, J. (2007), "A fingerprint technique for major weather events", *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **46**, pagg. 1053–1066.

[98] Rosso, Renzo (2002), *Manuale di Protezione Idraulica del Territorio*, Cooperativa Universitaria Studio e Lavoro (CUSI), Milano.

[99] Rotunno, R., Houze, R. (2007), "Lessons on orographic precipitation from the Mesoscale Alpine Programme", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **133**, pagg. 811–830.

[100] Sawyer, John Stanley (1963), "A semi-Lagrangian method of solving the vorticity advection equation", *Tellus* **15**, pagg. 336–342.

[101] Seed, A., Keenan, T. (2001), "A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting", Preprints, *30th Conference on Radar Meteorology*, Munich, Germany, *American Meteorological Society*, pagg. 492–494.

[102] Seed, A., Pierce, C. E., Norman, K. (2013), "Formulation and evaluation of a scale decomposition-based stochastic precipitation nowcast scheme", *Water Resources Research* **49**, pagg. 6624–6641.

[103] Shain, L. M., Norman, J. F. (2018), "Aging and the visual perception of motion direction: Solving the aperture problem", *Perception* **47**, pagg. 735-750.

[104] Smith, R. B., Barstad, I., Bonneau, L. (2005), "Orographic precipitation and Oregon's climate transition", *Journal of the Athmospheric Sciences* **62**, pagg. 177–191.

[105] Smith, R. B., Jiang, Q., Fearon, M. G., Tabary, P., Dorninger, M., Doyle, J. D., Benoit, R. (2003), "Orographic precipitation and air mass transformation: an Alpine example", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **129**, pagg. 433–454.

[106] Toth, Zoltan (1991), "Long-range weather forecasting using an analog approach", *Journal of Climate* **119**, pagg. 1501–1511.

[107] Tsonis, A., Austin, G. (1981), "An evaluation of extrapolation techniques for the short-term prediction of rain amounts", *Atmosphere-Ocean* **19**, pagg. 55-65.

[108] Vaccarono, M., Bechini, R., Chandrasekar, C. V., Cremonini, R., Cassardo, C. (2016), "An integrated approach to monitoring the calibration stability of operational dual-polarization radars", *Atmospheric Measurement Techniques* **9**, pagg. 5367–5383.

[109] Van den Dool, H. M. (1994), "Searching for analogues, how long must we wait?", *Tellus* **46A**, pagg. 314–324.

[110] Villarini, G., Krajewski, W. F. (2010), "Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall", *Surveys in Geophysics* **31**, pagg. 107–129.

[111] Viñas, José Miguel (2016), *L'universo meteorologico. Uno scienziato tra le nuvole*, Hachette, Milano.

[112] Von Foerster, H., Mora, P. M., Amiot, L. W. (1960), "Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026. At this date human population will approach infinity if it grows as it has grown in the last two millenia", *Science* **132**, pagg. 1291-1295.

[113] Wahba, G., Wendelberger, J. (1980), "Some New Mathematical Methods for Variational Objective Analysis Using Splines and Cross Validation", *Monthly Weather Review* **108**, pagg. 1122–1143.

[114] Whitman, C. David (2000), *Mountain Meteorology: fundamentals and applications*, Oxford University Press, New York.

[115] Wilson, J. W., Crook, N. A., Mueller, C. K., Sun, J., Dixon, M. (1998), "Nowcasting thunderstorms: A status report", *Bulletin of the American Meteorological Society* **79**, pagg. 2079–2099.

[116] Wolchover, Natalie (2011), "Can a Butterfly in Brazil Really Cause a Tornado in Texas?", sito web *LiveScience*.
`https://www.livescience.com/`
Ultimo accesso: Maggio 2021.

[117] Woo, W.-C., Wong, W.-K. (2017), "Operational Application of Optical Flow Techniques to Radar-Based Rainfall Nowcasting", *Atmosphere* **8**, pagg. 1-20.

[118] Zawadzki, Isztar (1973), "Statistical properties of precipitation patterns", *Journal of Applied Meteorology* **12**, pagg. 459-472.

[119] Zawadzki, I., Morneau, J., Laprise, R. (1994), "Predictability of precipitation patterns: An operational approach", *Journal of Applied Meteorology* **33**, pagg. 1562–1571.

[120] Zorthian, Julia (2017), "Stephen Hawking Says Humans Have 100 Years to Move to Another Planet", sito web *Time*.
`https://time.com/4767595/stephen-hawking-100-years-new-planet`
Ultimo accesso: Maggio 2021.