

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il
Territorio

Protezione Civile e Rischi Naturali



Tesi di Laurea Magistrale

Un sistema di monitoraggio in tempo
reale della rete pluviometrica ligure:
sviluppo ed applicazione dell'algoritmo
CorkDetective

Relatori

Prof. Pierluigi CLAPS

Ing. PhD. Angelo FORESTIERI

Candidato

Edoardo ROCCA

Marzo 2023

Sommario

Nel campo dell'idrologia operativa la misura pluviometrica e la stima radar sono due componenti indispensabili e complementari per il calcolo quantitativo delle piogge e per l'analisi della loro evoluzione spazio-temporale. In particolar modo, una corretta comprensione fenomenologica degli eventi in tempo reale diventa cruciale quando si entra nel campo del monitoraggio *nowcasting* di protezione civile. Sebbene il sistema di acquisizione radar possieda consolidati metodi di corretta interpretazione delle stime di pioggia, risultano solo di recente sperimentazione alcuni sistemi di verifica in continuo dello stato delle reti pluviometriche. Questo fatto rappresenta una carenza nel collaudato sistema di monitoraggio in tempo reale delle piogge, alla quale questo lavoro cerca di rispondere. Tale aspetto è ancora più decisivo in una regione con una geomorfologia complessa come la Liguria, storicamente colpita da intensi e frequenti fenomeni idrogeologici.

Alla luce dell'importanza della qualità dei dati per una ottimale modellazione idrologica, in questa tesi è sviluppato *CorkDetective*, un metodo in grado di definire quantitativamente la qualità del dato pluviometrico. La procedura è strutturata su controlli logici fisicamente basati che, accuratamente combinati tra loro, permettono di individuare la bontà di misura di ciascuna stazione e definirne un indice di qualità quantitativo (*QI*). I controlli si basano essenzialmente sui seguenti principi chiave: la coerenza spaziale e quella temporale delle piogge registrate dalla rete pluviometrica, e la consistenza di queste con le stime radar.

L'ossatura del metodo, basata sulla combinazione logica di semplici controlli, è il punto di forza che permette a futuri utilizzatori una buona comprensione delle verifiche implementate, oltre a minori costi in termini computazionali. Questi sono principi decisivi per una procedura destinata al monitoraggio *real-time*.

In fase di *back analysis*, la procedura proposta è risultata capace di riconoscere le stazioni pluviometriche critiche, in particolare individuando il problema tipico di occlusione, causato sia dalla deposizione di residui organici che dall'accumulo di precipitazioni nevose. Inoltre, l'indice di qualità dei dati di pioggia *QI* si è reso utile in fase di riconoscimento delle criticità di misura in tempo reale, ma allo stesso tempo può supportare per successive rielaborazioni idrologiche su una scala temporale maggiore. Infatti, nell'ambito della ricerca idrologica è noto quanto possa essere prezioso poter definire un grado di affidabilità quantitativo delle misure pluviometriche, che costituiscono il dato di base per innumerevoli applicazioni.

Abstract

In operational hydrology, rainfall measurement and radar estimation are two indispensable and complementary components for quantitatively calculating rainfall and analysing its spatiotemporal evolution. A correct phenomenological understanding of real-time events becomes crucial when entering the civil protection nowcasting monitoring field. Although the radar acquisition system possesses well-established methods for correctly interpreting rainfall estimates, some systems for continuously verifying the status of rainfall networks have only recently been tested. This fact represents a deficiency in the tested real-time rainfall monitoring system, which this work seeks to address. This aspect is even more decisive in regions with complex geomorphologies, such as the Liguria region (NW Italy), which has historically been affected by intense and frequent hydrogeological phenomena.

Considering the importance of data quality for optimal hydrological modelling, in this thesis CorkDetective is developed, a method capable of defining the quality of rainfall data through a quantitative quality index (QI). The procedure is structured on physically based logical controls that, carefully combined, allow the quantitative identification of the goodness of measurement of each station. The controls are based on the following fundamental principles: the spatial and temporal consistency of rainfall recorded by the rainfall network and the consistency of these with radar estimates. The framework of the method, based on the logical combination of simple checks, is the strength that allows future users a good understanding of the implemented checks, as well as lower costs in terms of computation. These are decisive principles for a procedure intended for real-time monitoring.

In back analysis phase, the proposed procedure was able to recognise critical rainfall stations, by identifying the typical problem of occlusion caused by both the deposition of organic residues and the accumulation of snowfall. In addition, the rainfall data quality index QI has been useful in recognising critical rainfall measurements in real time, but at the same time it can be of support for subsequent hydrological rework on a larger time scale. Indeed, in the field of hydrological research, it is well known how valuable it can be to be able to define a quantitative degree of reliability of rainfall measurements, which form the basic data for countless applications.

Indice

Elenco delle tabelle	III
Elenco delle figure	IV
Glossario	VII
Introduzione	1
1 Descrizione delle tecniche	2
1.1 Breve evoluzione storica delle misure pluviometriche	2
1.2 La misura pluviometrica	3
1.2.1 Tipi di misuratori di precipitazione	3
1.2.2 Il sito di installazione di un pluviometro	9
1.3 La spazializzazione delle piogge	10
1.4 La misura radar	11
1.4.1 Formalizzazione dell'acquisizione radar	12
1.4.2 Tipologie di radar meteorologici	14
1.4.3 Sorgenti di errore nella misura radar	14
1.5 La differenza radar-rete pluviometrica ed il loro <i>merging</i>	16
1.5.1 Le differenze: stima radar e misura pluviometrica	16
1.5.2 Breve introduzione al <i>Modified Conditional Merging</i> (MCM)	17
1.6 Perché un indice di qualità della rete pluviometrica	18
1.7 Il controllo qualità delle reti pluviometriche ed i sistemi esistenti . .	20
2 Il contesto ligure	23
2.1 Area geografica in analisi	23
2.1.1 Il regime climatico Ligure	23
2.1.2 I bacini idrografici liguri	27
3 OMIRL: Il monitoraggio idro-meteorologico ligure	32
3.1 La rete di monitoraggio OMIRL	32

3.1.1	Introduzione generale	32
3.1.2	Le specifiche della rete pluviometrica	35
3.1.3	Il sistema di monitoraggio attuale	37
3.2	La rete radar in Liguria	38
3.3	Caratteristiche dei dati OMIRL	38
3.3.1	Struttura dei dati provenienti dalle stazioni	38
3.3.2	Struttura del dato radar	41
4	Il metodo applicato	43
4.1	Valutazione del <i>RainGaugeQualityControl</i>	43
4.1.1	Struttura del metodo di riferimento	43
4.1.2	Studio della fattibilità applicativa al caso studio	47
4.2	Presentazione del metodo <i>CorkDetective</i>	51
4.2.1	Elementi cardine del metodo proposto	51
4.2.2	Formalizzazione dell'algoritmo <i>CorkDetective</i>	57
4.2.3	Il plugin <i>SnowyDet</i>	64
5	Discussione sul metodo proposto	70
5.1	Applicazione di <i>CorkDetective</i> ad eventi di pioggia passati	70
5.1.1	Risultati di CD per l'evento del 08.12.2022 - 09.12.2022	70
5.1.2	Stazione di Riccò del Golfo (SP)	73
5.1.3	Stazione di Premanico (GE)	75
5.1.4	Stazione di Alpe Vobbia (GE)	78
5.1.5	Stazione di Monte Pennello (GE)	78
5.2	Possibili miglorie e limitazioni del metodo	81
	Conclusioni	85
	A Evoluzione temporale dell'evento del 08.12.2022-09.12.2022	1
	B Supporti cartografici	11
	C Le tecniche di interpolazione	15
C.0.1	Metodi deterministici: <i>IDW</i>	15
C.0.2	Metodi geostatistici: <i>Kriging</i> e <i>GRISO</i>	15
	D La misura radar	20
	E Le specifiche tecniche della rete <i>OMIRL</i>	22
	Bibliografia	37

Elenco delle tabelle

4.1	I controlli di <i>RainGaugeQC</i> e la loro applicazione alla rete ligure tramite <i>CorkDetective</i>	49
4.2	I controlli implementati in <i>CorkDetective</i>	53
E.1	Le specifiche tecniche del pluviometro ETG - 1000cm ²	22
E.2	Le specifiche tecniche del pluviometro MTX - 1000cm ²	23
E.3	Le specifiche tecniche del pluviometro MTX - 400cm ²	23
E.4	Le specifiche tecniche degli apparati radar di Monte Settepani e Mont Vial	24
E.5	Le stazioni pluviometriche	25
E.6	Le stazioni termometriche	31

Elenco delle figure

1.1	<i>La stazione idro-meteorologica di Monte Pennello (GE) (Fonte Archivio ARPAL)</i>	4
1.2	<i>L'impianto radar meteorologico situato presso Monte Settepani (SV) [14]</i>	12
1.3	<i>Lo schema concettuale di un'apparecchiatura radar</i>	13
1.4	<i>Lo schema concettuale del metodo del Modified Conditional Merging [7]</i>	19
2.1	<i>Rappresentazione geografica della Liguria</i>	24
2.2	<i>La traccia tipica dei cicloni Vb [39]</i>	25
2.3	<i>Rappresentazione cartografica delle classi di bacino [45] per i bacini idrografici liguri</i>	29
2.4	<i>La distribuzione dei bacini idrografici liguri</i>	30
2.5	<i>La risposta idrologica dei bacini idrografici liguri a seconda del tipo di evento [45]</i>	31
3.1	<i>Distribuzione dei sensori installati sulle stazioni OMIRL</i>	33
3.2	<i>Rappresentazione geografica delle stazioni pluviometriche</i>	34
3.3	<i>Rappresentazione geografica delle stazioni termometriche</i>	35
3.4	<i>Localizzazione geografica degli apparati Radar di Monte Settepani e di Mont Vial, e dei principali ripetitori radio regionali.</i>	39
3.5	<i>Lo schema di trasmissione dei dati meteorologici dalle stazioni al DB ARPAL.</i>	40
3.6	<i>La risoluzione temporale di misura delle stazioni pluviometriche della rete OMIRL</i>	41
3.7	<i>La risoluzione temporale di misura delle stazioni termometriche della rete OMIRL</i>	42
4.1	<i>Lo schema concettuale dell'intera procedura</i>	58
4.2	<i>Lo schema concettuale della funzione CorkDetective</i>	60

4.3	<i>I controlli logici fisicamente basati all'interno della funzione Cork-Detective</i>	62
4.4	<i>Schema concettuale di SnowyDet, plugin di CorkDet</i>	66
4.5	<i>Schema logico dei controlli implementati in SnowyDet, plugin di CorkDet</i>	68
5.1	<i>La rappresentazione dello stato di qualità della rete alle ore 22:30 del 08.12.2022</i>	71
5.2	<i>La rappresentazione dello stato di qualità della rete alle ore 06:00 del 08.12.2022</i>	72
5.3	<i>Rappresentazione geografica della stazione di Riccò del Golfo</i>	73
5.4	<i>Andamento complessivo delle misure di precipitazione ed indice di qualità (QI) per la stazione di Riccò del Golfo e delle tre stazioni più prossime</i>	74
5.5	<i>Rappresentazione geografica della stazione di Premanico</i>	75
5.6	<i>Andamento complessivo delle misure di precipitazione ed indice di qualità (QI) per la stazione di Premanico e delle tre stazioni più prossime</i>	76
5.7	<i>Andamento complessivo delle misure di precipitazione e di temperatura per la stazione di Premanico e delle tre stazioni più prossime</i>	77
5.8	<i>Immagine recente (dicembre 2022) della stazione di Premanico (Fonte Archivio ARPAL)</i>	77
5.9	<i>Rappresentazione geografica della stazione di Alpe Vobbia</i>	79
5.10	<i>Andamento complessivo delle misure di precipitazione ed indice di qualità (QI) per la stazione di Alpe Vobbia e delle tre stazioni più prossime</i>	80
5.11	<i>Andamento complessivo delle misure di precipitazione e di temperatura per la stazione di Alpe Vobbia e delle tre stazioni più prossime</i>	80
5.12	<i>Rappresentazione geografica della stazione di Monte Pennello</i>	81
5.13	<i>Andamento complessivo delle misure di precipitazione ed indice di qualità (QI) per la stazione di Monte Pennello e delle tre stazioni più prossime</i>	82
5.14	<i>Andamento complessivo delle misure di precipitazione e di temperatura per la stazione di Monte Pennello e delle tre stazioni più prossime</i>	82
A.1	<i>I risultati di CD per l'08.12.2022 dalle 20:30 alle 21:00</i>	2
A.2	<i>I risultati di CD per l'08.12.2022 dalle 21:30 alle 22:00</i>	3
A.3	<i>I risultati di CD per l'08.12.2022 dalle 22:30 alle 23:00</i>	4
A.4	<i>I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 05:00 alle 05:30</i>	5

A.5	<i>I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 06:00 alle 06:30</i>	6
A.6	<i>I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 07:00 alle 07:30</i>	7
A.7	<i>I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 08:00 alle 08:30</i>	8
A.8	<i>I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 09:00 alle 09:30</i>	9
A.9	<i>I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 10:00 alle 10:30</i>	10
B.1	<i>I bacini idrografici liguri maggiori di 100 km²</i>	12
B.2	<i>I bacini idrografici liguri di ponente compresi tra 10 e 100 km²</i>	13
B.3	<i>I bacini idrografici liguri di levante compresi tra 10 e 100 km²</i>	14
C.1	<i>Il grafico di covarianza ed il variogramma teorico</i>	16

Glossario

ARPAL

Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure

WMO

World Meteorological Organization

GRISO

Rainfall Generator of Spatial Interpolation from Observation

RADAR

Radio Detection And Ranging

CM

Conditional Merging

MCM

Modified Conditional Merging

OMIRL

Osservatorio Meteo Idrologico della Regione Liguria

CED

Centro Elaborazione Dati

GPRS

General Packet Radio Service

DB

Database

IMGW

Institute of Meteorology and Water Management

QI

Indice di Qualità

NA

Not Available

GEC

Controllo d'Errore Grossolano

RC

Controllo della Climatologia Locale

SF

Funzione di Somiglianza

RCC

Controllo di Conformità Radar

TCC

Controllo di Coerenza Temporale

SCC

Controllo di Coerenza Spaziale

CD

Algoritmo Cork Detective

SD

Algoritmo Snowy Detective

Introduzione

La tematica che riguarda la corretta gestione della risorsa idrica è oggi come non mai di cruciale attualità, dal momento che l'estate 2022 è stata coinvolta dal caso di siccità più grave degli ultimi 500 anni (fonte *Copernicus EU*), e l'anno in corso (2023) sembra procedere verso una situazione di crisi idrica ancor più senza precedenti. Inoltre, questi periodi di scarsità idrica sono accompagnati da eventi di pioggia estremi dalle potenzialità devastanti, come conferma una recente analisi di rischio dovuta ai cambiamenti climatici in Italia del Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici [1]. Ma una corretta gestione del prezioso e talvolta pericoloso ciclo dell'acqua non può prescindere dalla qualità dell'informazione sulla sua potenziale alimentazione, ovvero le piogge, ed è in questo contesto che si sviluppa il lavoro oggetto della presente tesi.

Si tratta in una prima fase la misura pluviometrica, con una breve introduzione storica sulle sue origini e una più dettagliata e completa sezione circa le tecniche di misura della pioggia e sulla sua spazializzazione (nel presente capitolo). Si fa riferimento in particolare alla misura delle stazioni pluviometriche (paragrafo 1.2) ed alla stima del dato radar (paragrafo 1.4), nonché della combinazione dei due sistemi (paragrafo 1.5). Di seguito si tratta il contesto scientifico nel quale si colloca il lavoro presentato, ovvero i sistemi di misura della qualità del dato pluviometrico (paragrafo 1.7). In seconda battuta si esegue un'analisi del contesto geografico, del regime meteorologico ed idrografico dell'area di applicazione del metodo sviluppato: la regione Liguria (capitolo 2). In seguito si riportano le caratteristiche del complesso sistema oggetto dell'analisi, ovvero la rete di monitoraggio meteo-idrologico della Regione Liguria (capitolo 3). Si illustrano successivamente nel paragrafo 4.1 le caratteristiche del metodo a cui ci si è ispirati per lo sviluppo dell'algoritmo oggetto di questa tesi, il quale è dettagliatamente presentato nei capitoli successivi (4.2). Quindi si riporta nel paragrafo 5.1, a titolo d'esempio, uno dei casi pratici di una pioggia, avvenuto nel dicembre 2022, con i quali è stato testato l'algoritmo sviluppato. Di seguito si analizzano i risultati e alcuni possibili sviluppi e migliorie del metodo (paragrafo 5.2), ed infine le conclusioni che se ne deducono (5.2).

Capitolo 1

Descrizione delle tecniche

1.1 Breve evoluzione storica delle misure pluviometriche

Andando indietro nel tempo, già gli antichi babilonesi mostrarono, più di 5'000 anni fa, interesse nel misurare i fenomeni meteo-idrologici [2], e lo stesso libro di astrologia cuneiforme di Assurbanipal indica i babilonesi come degli attenti osservatori delle nubi, del vento e soprattutto delle piogge.

Nella sua forma primordiale, il primo pluviometro utilizzato fu prodotto in India intorno al IV secolo a.C., allo scopo di introdurre un sistema di tassazione agricola in base alla esposizione più o meno prolungata delle terre alle piogge monsoniche. La sua comparsa nel bacino mediterraneo avvenne invece grazie al popolo ebraico in Palestina, intorno al I secolo d.C., mentre la prima testimonianza di un pluviometro realizzato allo scopo di misurare la precipitazione nevosa arriva dalla Cina, e risale al 1247.

Le basi del pluviometro moderno hanno però radici nella penisola italiana. Infatti, è Benedetto Castelli (1577-1644) che nel 1639 progetta il suo prototipo, che così commenta in una corrispondenza all'amico Galileo Galilei: *“Preso un vaso di vetro, di forma cilindrica, alto un palmo in circa e largo mezzo palmo, notai diligentemente il segno dell'altezza dell'acqua del vaso, e poi l'esposi all'aria aperta a ricevere l'acqua della pioggia, che ci cascava dentro”* [3].

Il primo pluviometro automatico con meccanismo a bilancia venne inventato dall'inglese Sir Christopher Wren (1632-1723), allora presidente della Royal Society [2]. Il suo prototipo fu il primo a registrare le misurazioni che poteva effettuare, mentre quelli antecedenti misuravano senza eseguire alcun tipo di registrazione . [2] Questa tipologia di pluviometro, ovvero con meccanismo a bilancia, allora ideata e sperimentata, è tutt'oggi quella a maggior diffusione ed affidabilità, come si illustra nella sezione 1.2.1.

1.2 La misura pluviometrica

Le precipitazioni sono definite dalla *World Meteorological Organization*(WMO) come i prodotti liquidi o solidi della condensazione del vapore acqueo che cade dalle idrometeore, sotto forma di pioggia, pioviggine, neve, granelli di neve, grandine e granelli di ghiaccio; oppure dall'aria limpida sotto forma polverosa [4].

Le precipitazioni solide sono meno dense delle corrispettive liquide, essendo questa una delle caratteristiche più peculiari del composto Acqua, e più variabili in termini di struttura (ad esempio per le diverse forme di cristalli di ghiaccio) e di aerodinamica correlata. Il vapore acqueo, o umidità in questo caso, può essere trasferita al suolo anche attraverso la rugiada, la brina, o la nebbia, ma queste forme non sono incluse nella definizione di precipitazione [4].

L'intensità delle precipitazioni è definita come la quantità di pioggia raccolta per unità di tempo [4]. Da questa definizione si evince che l'intensità di precipitazione è un parametro secondario della precipitazione misurata dai pluviometri ordinari WMO oppure può essere misurata direttamente, come viene effettuato comunemente dai pluviometri che compongono le reti ordinarie.

1.2.1 Tipi di misuratori di precipitazione

I misuratori di precipitazione (o pluviometri se è possibile misurare solo le precipitazioni liquide) sono gli strumenti più comuni utilizzati per misurare le precipitazioni [4]. In genere, un misuratore di precipitazione è composto da un recipiente con i lati verticali, di solito a forma di cilindro retto, aperto sulla sommità. La struttura cilindrica è connessa con una struttura conica, a forma di imbuto verticale. Si riporta a titolo d'esempio il pluviometro della stazione meteorologica di Monte Pennello (GE), il primo componente a sinistra della figura 5.12.

La precipitazione così raccolta viene trasferita semplicemente con l'uso della forza di gravità al sottostante strumento di misurazione. I tipi di misuratori di precipitazione si differenziano quindi nella modalità di misura della precipitazione, e soprattutto nella sua registrazione.

Pluviometri totalizzatori

I pluviometri totalizzatori sono strumenti nei quali la precipitazione raccolta viene accumulata e conservata tra un'osservazione ed un'altra. Sono gli strumenti di misura più semplici dai quali l'intensità di pioggia è ricavabile solo come misura secondaria del volume raccolto e misurato.

Solitamente, l'acqua raccolta viene misurata tramite un'asta graduata immersa nel contenitore, le cui dimensioni di raccolta raccomandate dal WMO sono almeno di 200 cm², ma più preferibilmente fino a 500 cm². Di seguito si riportano le



Figura 1.1: *La stazione idro-meteorologica di Monte Pennello (GE) (Fonte Archivio ARPAL)*

specifiche WMO, raccomandate per la progettazione delle strutture di raccolta dei pluviometri:

- Il bordo del collettore deve avere uno spigolo vivo e deve cadere verticalmente all'interno, mentre all'esterno deve essere fortemente smussato.
- La misurazione della neve deve essere tale da evitare il restringimento dell'orifizio causato dall'accumulo di neve bagnata, quindi ad apertura abbastanza larga.
- L'area dell'orifizio deve essere nota con l'approssimazione dello 0,5% e la costruzione deve essere tale da mantenere costante l'area durante il normale utilizzo.
- Il collettore deve essere progettato in modo da impedire alla pioggia di entrare e uscire. Questo può essere ottenuto se la parete verticale è sufficientemente profonda e la pendenza dell'imbuto è sufficientemente ripida (almeno del 45%).

- La costruzione deve essere tale da ridurre al minimo gli errori di bagnatura, riducendo al minimo la superficie interna totale del collettore e scegliendo un materiale il più possibile poco bagnabile.
- Il contenitore deve avere un'entrata stretta e deve essere sufficientemente protetto dalle radiazioni per ridurre al minimo la perdita di acqua per evaporazione.

I pluviometri totalizzatori sono utilizzati principalmente nelle regioni remote di alta montagna per rilevare i quantitativi di precipitazione nell'arco di un anno, misurando i quantitativi di precipitazione caduta dalla fine di settembre alla fine di settembre dell'anno successivo [5].

Pluviometri a pesata

In questi strumenti, il peso del contenitore, insieme alla precipitazione accumulata al suo interno, viene registrato in modo continuo utilizzando un meccanismo a molla, un sistema di pesi di bilanciamento, o tramite trasduttori a filo vibrante e celle di carico [4].

I pluviometri a pesata, a differenza dei totalizzatori, sono in grado di registrare ad ogni istante la precipitazione raccolta, misurando quindi direttamente l'intensità della precipitazione in atto, registrandola su un apposito supporto cartaceo o digitale. Infatti, originariamente i pluviometri in grado di tenere traccia dell'evoluzione temporale di un evento di pioggia erano definiti pluviografi, in virtù del supporto cartaceo su cui veniva tenuta traccia da un pennino l'intensità della precipitazione [6].

Nei pluviometri a pesata tutte le precipitazioni, sia liquide che solide, vengono registrate nell'istante in cui queste sono raccolte dal misuratore, che normalmente non prevede il suo svuotamento. La capacità (cioè l'accumulo massimo tra una ricarica e l'altra) varia da normalmente da 250 a 1 500 mm [4]; per questo motivo i modelli a bassa capacità dovrebbero essere evitati nelle aree in cui l'accumulo massimo potrebbe verificarsi in brevi periodi di tempo.

I pluviometri a pesata sono particolarmente utili per la registrazione di neve, grandine e miscele di neve e pioggia, poiché non è necessaria la loro fusione prima di poter essere registrate. In ogni caso, per il funzionamento invernale, il contenitore di raccolta viene caricato con una soluzione antigelo che fonde rapidamente la precipitazione solida.

Un ulteriore aspetto molto positivo dei pluviometri a pesata è l'assenza di parti meccaniche in movimento nel meccanismo di misura. Pertanto, il degrado meccanico e la conseguente necessità di manutenzione sono significativamente ridotti, fattori invece non trascurabili nei pluviometri totalizzatori, come riportato in sezione 1.2.1. Inoltre, molti strumenti sono in grado di generare in output dei

parametri diagnostici utili per successive valutazioni dei dati raccolti e di una loro analisi di qualità. La tecnica di misura a pesata è stata recentemente combinata con pluviometri a bascula per migliorare la risoluzione in termini di volume di pioggia misurata. [4]

I pluviometri a pesata possiedono tuttavia alcune limitazioni, che ne hanno limitato la diffusione. Innanzitutto, questi non sono in grado di distinguere automaticamente la natura della precipitazione in corso. In secondo luogo, si è riscontrato che pioggia gelata o neve bagnata aderiscono alle pareti del pluviometro, cadendo all'interno del contenitore di pesatura solo in un secondo momento, alterando la lettura dell'intensità di pioggia con picchi inattesi. Un ulteriore difetto comune dei pluviometri a pesata è il *wind-pumping*, fenomeno che si verifica in concomitanza di correnti molto intense e turbolente che inviluppano il contenitore di raccolta, comportando di conseguenza un'oscillazione del meccanismo di pesatura e la invalidazione della sua lettura. Solitamente si cerca di minimizzare questo problema attraverso il calcolo medio di più letture eseguite su brevi intervalli, da 1 a 5 minuti. [4]

Pluviometri a bascula

Il pluviometro a bascula è senza dubbio il più comune strumento della rete pluviometrica nazionale [7] ed il principio su cui si fonda è estremamente semplice ma efficace. Lo strumento di misura è composto da un raccoglitore (la bascula) composto da due compartimenti identici e non comunicanti tra loro, incernierato su un perno. Quando uno dei due compartimenti si trova in posizione di raccolta, l'altro è in posizione di scarico, fino a che il primo non sarà pieno. In quell'istante il compartimento di raccolta si trova in una situazione di disequilibrio, che comporta un suo ribaltamento verso il basso, portando l'altro compartimento della bascula in posizione di raccolta.

La massa d'acqua contenuta in ciascun compartimento al momento del suo ribaltamento è costante $m[g]$, pertanto è possibile ottenere il volume corrispondente $V[cm^3]$, noto che la densità dell'acqua è $\rho = 1g/cm^3$. Di conseguenza è possibile ricavare l'altezza d'acqua accumulata $h[mm]$ sulla superficie del collettore principale del pluviometro $S[cm^2]$.

$$V = m/\rho = h \cdot S \quad (1.1)$$

In virtù di quanto detto, un'altezza di pioggia pari a 1 mm corrisponde a 1 g di acqua raccolta da un'area di 10 cm². Di conseguenza un'area di 1000 cm² corrisponde ad una massa d'acqua raccolta di 20 g. La WMO raccomanda di non superare l'altezza di pioggia di 0.2 mm per una corretta registrazione della precipitazione in corso.

Il sistema di registrazione è costituito da un circuito elettrico (interruttore reed o contatto di relè) che emette un impulso ad ogni ribaltamento del meccanismo a bascula. L'impulso elettrico viene letto da un data logger o da un sistema ADC (nel caso di interruttore reed) che permette la misura in continuo dello strumento [6].

L'intensità di pioggia misurata da pluviometri a bascula viene solitamente ottenuta dalla media su un intervallo di tempo scelto (ad esempio un minuto) delle misure eseguite in un periodo di campionamento costante (tipicamente ogni 6 o 10 s). In questa modalità si avrà un dato raccolto alla risoluzione dell'intervallo temporale scelto. Questo metodo permette di eliminare alcune incertezze di misura, ma non la dipendenza dall'intensità di pioggia della misura [4]. Infatti, l'intensità registrata dipende dalla dimensione dei compartimenti della bascula e dall'intervallo di misura scelto. Ad esempio, un ribaltamento equivalente a 0.2 mm in un minuto comporta un'intensità di pioggia pari a 12 mmh^{-1} , la quale resterebbe costante nell'intervallo di misura se non venisse applicata alcuna correzione. È quindi raccomandabile [4] eseguire delle correzioni intensità-dipendenti alle misure raccolte. Questo avviene in prima battuta attraverso la calibrazione in laboratorio, facendo defluire un quantitativo noto di acqua attraverso lo strumento su vari intervalli temporali e calibrando il meccanismo in virtù dei valori volumetrici noti. Inoltre, è fondamentale una calibrazione ed un controllo periodico in campo.

Per un sistema a bascula, si possono presentare le seguenti comuni fonti di errore sistematico[4]:

- Perdita d'acqua durante l'azione di ribaltamento in caso di forti piogge, sebbene questo fenomeno possa essere notevolmente ridotto effettuando una calibrazione dinamica dello strumento e applicando una correzione in funzione dell'intensità.
- In regioni e stagioni molto calde ed in concomitanza di piogge di ridotta intensità, la componente di acqua raccolta evaporata può essere molto elevata, a causa dell'elevata superficie dello strumento rispetto al volume di pioggia raccolto.
- In caso di eventi di bassa intensità di precipitazione, la registrazione potrebbe essere poco soddisfacente, per via della natura discontinua del sistema di misura. Questo è tanto più comune per gli istanti di inizio e di fine di una pioggia. Sono state però sviluppate alcune tecniche di calcolo che permettono di ridurre l'impatto di questi comuni errori sorti nel regime delle piogge leggere [8].
- Come nel caso dei pluviometri a pesata, anche quelli a bascula possono soffrire del fenomeno di aderenza di acqua sulle sue pareti, a causa della bagnabilità della superficie di raccolta.

- Il misuratore a bascula può risentire in fase di misurazione della posizione non perfettamente verticale del supporto rispetto al terreno.

Viste quindi le numerose fonti di errori di misura che possono interessare un pluviometro a bascula, si utilizzano in genere procedure che permettono di ottenere dei fattori correttivi della misura, definiti rispetto al funzionamento standard. Questi variano da strumento a strumento e possono non mantenersi costanti durante l'utilizzo dello stesso, passando da valori superiori ad 1.0 per pluviometri tendenti alla sottostima a minori di 1.0 per sensori che tendono alla sovrastima. [4]

Pluviometri a galleggiante

In questa tipologia di strumenti, ormai poco diffusa, la pioggia è convogliata in un compartimento in cui è presente un leggero galleggiante collegato ad un pennino, in modo tale che come il livello dell'acqua raccolto si innalza questo si traduce in una spinta verso l'alto del galleggiante e di conseguenza nel tracciamento di un innalzamento del livello da parte del pennino.

Per poter registrare una misurazione almeno su base oraria, è necessario che la camera di raccolta della pioggia sia sufficientemente grande in modo da evitare che si colmi troppo velocemente, oppure di avere un sistema di svuotamento automatico nel momento in cui questa è piena, riportando il pennino nella posizione iniziale.

Disdrometri

I disdrometri misurano lo spettro delle particelle che compongono la precipitazione attraverso il momento trasferito ad un trasduttore dalle particelle nell'istante in cui queste urtano un rivelatore, oppure attraverso la riflettività (si veda il riferimento alla misura della riflettività al seguente capitolo 1.4) delle idrometeore una volta che queste sono colpite da un fascio di luce o di microonde. [9]

Questo tipo di strumentazione sofisticata ha il vantaggio di provvedere ad una completa caratterizzazione della distribuzione delle dimensioni delle particelle che costituiscono un'idrometeora [6]. Il costo molto elevato di questa tipologia di pluviometri li rende però commercialmente poco competitivi rispetto ai più tradizionali pluviometri a bascula.

Pluviometri acustici

È noto che la misurazione delle precipitazioni sui laghi e sul mare è particolarmente problematica. Tuttavia, il rumore che le gocce di pioggia producono quando colpiscono una superficie d'acqua può essere intercettato da un microfono particolarmente sensibile. Sulla base di questa intuizione sono stati sviluppati i pluviometri acustici, per i quali lo spettro acustico delle gocce di pioggia, che impattano il pelo

libero dello specchio d'acqua interessato, permette di rivelare la distribuzione delle loro dimensioni, e di conseguenza la quantità di pioggia.

Seguendo questo principio, la tecnologia dei profilatori acustici, attualmente impiegati nella misura dei profili del vento, potrebbe essere in futuro utilizzata anche nella misurazione della precipitazione [6].

1.2.2 Il sito di installazione di un pluviometro

In questa sezione sono riportate alcune raccomandazioni ottimali WMO di scelta del sito di installazione di un pluviometro, e delle possibili interazioni tra questo e la strumentazione di misura.

L'apertura del raccoglitore cilindrico può essere posta sia alla stessa altezza del suolo oppure ad una quota sopraelevata variabile a seconda dell'area scelta per la sua installazione, in modo tale che questa non venga raggiunta da un possibile fenomeno di *in-splashing* dal terreno o da un possibile manto nevoso. Solitamente le altezze di installazione più comuni sono comprese tra 0.5 e 1.5m [4].

La misura della precipitazione è molto sensibile al contesto ambientale del sito in cui è installato il pluviometro, ed in particolar modo nei confronti dei flussi ventosi. Quest'ultimo fattore è ancor più vero per la misura della precipitazione solida, a causa della sua densità inferiore che ne comporta una maggior trasportabilità da parte del vento. Infatti, secondo la WMO, il vento è la principale fonte di disturbo nelle misure di precipitazione, a causa dell'interazione dello strumento sul flusso d'aria[4]. Quest'ultima può essere ridotta con l'installazione di scudi antivento attorno l'apertura cilindrica dello strumento. È comunque buona pratica [4] scegliere come sito di installazione dello strumento un'area circondata per lo più da ostacoli di altezza uniforme, in modo tale che quest'ultimi svolgano un'azione frangivento per i flussi d'aria provenienti da ogni direzione. Si può definire ostacolo un oggetto qualsiasi ad ampiezza angolare di almeno 10° dalla bocca dello strumento, ed un insieme di ostacoli è considerato di altezza uniforme se il rapporto tra l'altezza dell'ostacolo più alto e quello più basso è inferiore a 2. [4]

Le condizioni appena citate sono praticamente irrealistiche, ma se non soddisfatte sono inclini a generare turbolenze, producendo forti distorsioni nelle misurazioni. Questo è il motivo per cui le norme più realistiche di installazione della stazione impongono una certa distanza dagli ostacoli. [4].

Efficaci scudi frangivento naturali sono i boschi, sia di alberi che di arbusti o di macchia. È tuttavia importante tenere a mente che la vegetazione può svolgere una azione di supporto alla misurazione, come barriera antivento naturale, ma può anche ostacolarla. Infatti, poiché che questa subisce un accrescimento naturale o comunque una variazione areale nel tempo, potrebbe interagire con la bocca di raccolta dello strumento, falsando così la misura effettiva dell'intensità di pioggia. Inoltre, anche il degrado biologico naturale può intaccare la misurazione del pluviometro, intasando

la bocca di raccolta con la deposizione di materiale organico (ad esempio residui di foglie o rami). Questa problematica risulta abbastanza comune nella pratica, come riportato alla sezione 5.

La WMO definisce fino a 5 classi di possibili siti di installazione delle stazioni pluviometriche, con la classe 1 che rappresenta il caso ideale e la classe 5 per il sito che comporta la situazione di misura più sfavorevole. Tuttavia, le principali raccomandazioni WMO per limitare gli effetti del vento sono l'utilizzo di un misuratore a livello del suolo nel caso di precipitazioni liquide ed accorgimenti per rendere il flusso d'aria orizzontale al di sopra dell'orifizio del misuratore, utilizzando le seguenti tecniche di efficacia decrescente:

- In aree con vegetazione omogenea e densa, l'altezza delle piante deve essere mantenuta allo stesso livello del misuratore mediante un taglio regolare;
- In altre aree, simulando l'effetto di barriera boschiva naturale, attraverso l'uso di strutture di recinzione adeguate;
- Utilizzando strutture frangivento intorno al misuratore.

La superficie che circonda il misuratore di precipitazione può essere coperta da erba corta, ghiaia o tegole, ma si dovrebbero escludere le superfici dure e piatte, come il cemento, per evitare eccessivi *in-splashing* dal suolo nella bocca del misuratore [4].

1.3 La spazializzazione delle piogge

Le precipitazioni rientrano nella definizione geostatistica di *variabile regionalizzata*, e la loro interpolazione prevede l'estensione del dato puntuale misurato dai pluviometri su scala areale.

Le tecniche di interpolazione spaziale svolgono un ruolo fondamentale nelle scienze ambientali in generale e nello specifico in idrologia. Queste permettono di estendere in forma regionalizzata il dato misurato puntualmente all'interno di un'area di indagine, grazie ad un sistema di pesatura delle variabili misurate (definite variabili regionalizzate). [10] Solitamente la stima delle variabili non strumentate avviene tramite lo studio della variabilità a piccola scala dei punti noti del campo, situati in prossimità del punto da stimare, attraverso la loro combinazione lineare [11]. La stima della variabile regionalizzata in un punto qualsiasi del campo è definita matematicamente con la seguente scrittura 1.2.

$$Z^*(x, y) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i, y_i) \quad (1.2)$$

Dove Z^* è la variabile stimata, Z quella misurata nel punto x_i, y_i , n il numero dei punti osservati e λ_i sono costanti incognite definite *ponderatori*. I ponderatori sono quindi i parametri del modello che permettono di stimare la variabile regionalizzata in punti non noti. Questi possono essere ottenuti secondo due principali tecniche:

- Tecniche deterministiche.
- Tecniche geostatistiche.

Le prime non considerano la variabilità spaziale delle variabili regionalizzate misurate, ma si basano solamente su impostazioni puramente geometriche (tipicamente di vicinanza). Le seconde considerano invece la variabilità spaziale delle misure effettuate, andando a minimizzare la varianza di stima nel calcolo dei ponderatori λ . Sono solitamente definite come tecniche di Kriging, in onore dell'ingegnere sudafricano D.G. Krige che per primo le formalizzò. [11]

Il *GRISO* (Rainfall Generator of Spatial Interpolation from Observation) [12] è un algoritmo di interpolazione geostatistico molto simile al Kriging, sebbene presenti alcune differenze di calcolo rispetto alle tecniche geostatistiche ordinarie, che permettono una migliore stima delle caratteristiche locali delle precipitazioni.

Si rimanda all'appendice C di questo lavoro per una trattazione più approfondita dei metodi di interpolazione, che sono di assoluta importanza per la spazializzazione delle misure pluviometriche, che tuttavia esulano dagli obiettivi principali di questo lavoro.

1.4 La misura radar

Un *radar* (Radio Detection And Ranging) è essenzialmente un'apparecchiatura composta da un'antenna in grado di individuare la posizione di un oggetto nello spazio a sé circostante, attraverso l'emissione di un'onda elettromagnetica e la ricezione del suo segnale di ritorno (*eco*) [13]. Si riporta in figura 1.2 un'immagine rappresentante un'apparecchiatura radar, ovvero l'impianto regionale di Monte Settepani (SV).

Un sistema radar è composto da alcuni elementi fondamentali (come riportato nello schema di figura 1.3):

- Una antenna che focalizza il segnale in una direzione assegnata.
- Un trasmettitore che genera l'onda elettromagnetica che l'antenna emanerà nell'atmosfera.
- Un modulatore che controlla il trasmettitore nella generazione dell'onda.
- Una guida d'onda che trasferisce in modo ottimizzato il segnale dal trasmettitore all'antenna.



Figura 1.2: *L'impianto radar meteorologico situato presso Monte Settepani (SV)* [14]

- Un ricevitore che riceve ed amplifica il segnale di ritorno ricevuto dall'antenna.
- Un interruttore automatico (switch trasmissione/ricezione) che permette di escludere dal circuito il ricevitore quando è in funzione il trasmettitore.

In particolare, un radar meteorologico permette di rilevare, all'interno di un volume di atmosfera, la presenza di idrometeore, cioè di gocce di pioggia, che influenzano la propagazione del fascio radar attraverso onde elettromagnetiche. [13]

1.4.1 Formalizzazione dell'acquisizione radar

Un radar meteorologico è così in grado di ricevere un segnale di ritorno che dipende dalla massa degli oggetti che il segnale incontra lungo il suo cammino, in particolare le idrometeore e le gocce d'acqua che le costituiscono. L'eco di ritorno al ricevitore dell'antenna radar viene convertito in una grandezza definita fattore di riflettività o più comunemente riflettività, ottenuta dall'equazione del radar meteorologico[15].

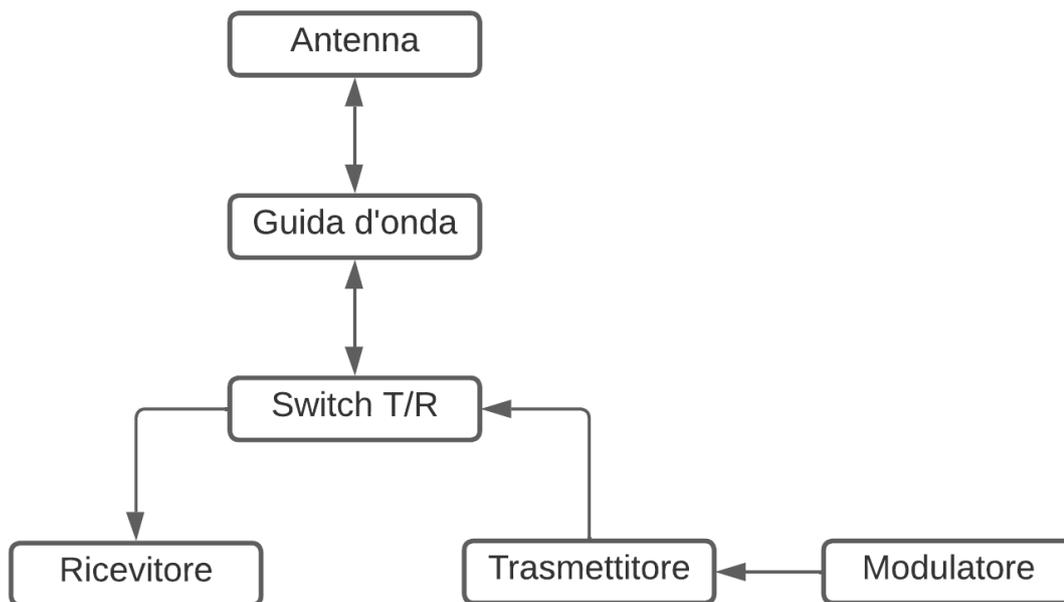


Figura 1.3: Lo schema concettuale di un'apparecchiatura radar

Esaustive dimostrazioni empiriche [16] provano infatti che è possibile ottenere, tramite analisi di regressione, la relazione che lega la riflettività Z ed il tasso di pioggia R , la cui relazione segue generalmente una legge di potenza del seguente tipo. 1.3

$$Z = aR^b \quad (1.3)$$

In questa relazione 1.3, più comunemente espressa come espressione di Marshall-Palmer, i parametri a e b sono tipici del comportamento locale e stagionale della zona analizzata, riflettendo quindi il carattere climatologico locale e del tipo di precipitazione (ad esempio stratiforme, convettivo od orografico) a cui appartiene l'idrometeora analizzata [15]. Per i fini idrologici si fa riferimento alla legge di Marshall-Palmer invertita, in modo da ottenere l'intensità di pioggia, tramite il tasso R . Tipicamente le costanti a e b sono assunte:

- Costanti nello spazio e nel tempo, definendo la relazione $Z - R$ di tipo non adattivo. In questo caso, a livello italiano tipicamente si adottano a pari a 200 e b pari a 1.6 [17].
- Variabili sia nel tempo che nello spazio, definendo quindi una relazione $Z - R$ non adattiva.

Per una trattazione formale delle espressioni che definiscono la stima radar, si rimanda alla sezione in appendice D.

1.4.2 Tipologie di radar meteorologici

Le tipologie di apparecchiature radar utilizzate per scopi meteorologici sono caratterizzate da una frequenza operativa di emissione, ottenuta dal compromesso tra le condizioni di propagazione dell'onda elettromagnetica nell'atmosfera ed i requisiti tecnici dello strumento [13].

Alle latitudini europee si ha la tendenza ad utilizzare prevalentemente apparecchiature radar con funzionamento in banda C, in virtù delle affidabili capacità di scansione, in grado di generare un fascio di trasmissione dell'ordine dei quattro metri di diametro e di fornire una stima quantitativa di precipitazione a circa 100 km di distanza dall'antenna e qualitativa fino a distanze di 200 km circa. Sono spesso utilizzati anche apparecchi che operano in banda X, di dimensione più ridotta e versatile ma con le stesse prestazioni dei radar funzionanti in banda C, sebbene con range ridotti, arrivando a stime precise per distanze non superiori agli 80 km [13].

Inoltre, le apparecchiature radar possono essere anche sviluppate con strumentazione che sfrutti l'effetto *doppler*, ovvero in grado di rilevare la velocità dell'oggetto riflettente in base alla variazione della frequenza dell'onda ricevuta in un istante di tempo $t + dt$ rispetto alla frequenza dell'onda ricevuta nell'istante t . Un radar doppler è quindi in grado di misurare la componente radiale di velocità di spostamento delle idrometeore, ovvero lungo la congiungente tra queste e l'antenna. Come si intuisce, questa tecnologia permette di identificare lo spostamento compiuto dal fronte di precipitazione nell'arco di due misure consecutive, e quindi di monitorare la sua evoluzione spaziale nel tempo [18].

Infine, è necessario specificare che le onde trasmesse da un'antenna radar possono essere sia polarizzate che non polarizzate. Le prime sono in grado di individuare una particella di pioggia nello spazio in maniera monodimensionale, senza quindi averne una caratterizzazione di forma, capacità invece tipica delle onde polarizzate. Quest'ultime sono in grado di riconoscere la forma delle particelle che compongono le idrometeore, e di conseguenza di definire la natura della precipitazione, che sia formata da gocce d'acqua, di grandine o di neve [19] [9].

1.4.3 Sorgenti di errore nella misura radar

La stima meteo-pluviometrica eseguita a partire dal prodotto radar grezzo è soggetta ad alcune sorgenti di errore che se non corrette non permettono una stima quantitativa e quindi ben rappresentativa delle idrometeore scansionate. Generalmente si è soliti parlare di sorgenti di errore di natura tecnico-strumentale, di natura topografica e di natura fisico-modellistica. [13]

Le sorgenti di errore di natura tecnico-strumentale sono solitamente individuate nel cosiddetto *clutter* o propagazione anomala del fascio. [13] Questo fenomeno avviene in concomitanza con la riflessione del fascio emesso dal radar da parte

di ostacoli artificiali o naturali. Dal momento che gli ostacoli che producono il fastidioso *clutter* sono in genere posizionati a livello del suolo, si parla anche di *ground clutter*. I *clutter* interferiscono quindi con il fascio emesso, producendo una interferenza nell'onda ricevuta dall'antenna in fase di ricezione. Questa interferenza è molto significativa, vista la sua larghezza, e produce una elevata variazione della riflettività rilevata.

Per sorgenti di errore di natura topografica si intende solitamente l'interazione tra i rilievi orografici, che intercettando il fascio emesso dal radar ne assorbono e riflettono una parte, riducendo l'energia. Questo comporta una stima non corretta delle idrometeore che si trovano a distanze maggiori rispetto al rilievo che ha comportato la sua parziale o talvolta anche totale occlusione. In gergo tecnico questo fenomeno è denominato come *shielding* o *blocking*. [13]

Infine, si parla di errori di tipo fisico-modellistico principalmente in concomitanza di [13]:

- Attenuazione del segnale in seguito all'impatto con le gocce di pioggia delle idrometeore. Infatti, la riflessione delle gocce di pioggia non è uniforme, e quindi la componente dell'energia che le investe non viene restituita interamente come onda riflessa nella direzione utile del radar, ma in tutte le possibili direzioni. L'effetto, sommato ad una quota di energia di assorbimento da parte delle gocce di pioggia, comporta un segnale di ritorno molto indebolito con un conseguente rischio di sottostima della precipitazione in corso.
- Effetto della curvatura terrestre, che comporta un'osservazione non orizzontale dell'atmosfera, aumentando la quota della porzione di atmosfera scansionata dal radar. Dal momento che il profilo di riflettività non è costante con la quota e che le stesse idrometeore possono presentare una variabilità verticale notevole, l'osservazione eseguita a quote elevate può non essere rappresentativa di ciò che si osserva in termini di effetti al suolo.
- Una naturale ma estrema variabilità spaziale e temporale del campo di precipitazione. Questo fa sì che la stima o "inversione" delle piogge possa risultare approssimata.

Queste fonti di errore, assolutamente non accettabili per ottenere una stima accurata dei fenomeni precipitativi individuati in atmosfera, possono essere parzialmente compensate con alcune tecniche di oramai ordinaria applicazione sul territorio nazionale [20], tra cui:

- La combinazione di osservazioni radar di una stessa porzione di atmosfera da parte di più apparecchiature, attraverso il processo della mosaicatura del prodotto radar.

- Algoritmi di correzione basati sull'individuazione di indici di qualità del dato radar raccolto, volti a definire un peso nella definizione del prodotto finale.
- L'accoppiamento con il dato puntuale a terra attraverso la tecnica del *merging* radar-pluviometrico.

1.5 La differenza radar-rete pluviometrica ed il loro *merging*

1.5.1 Le differenze: stima radar e misura pluviometrica

Il primo aspetto che differenzia il dato radar da quello pluviometrico si ritrova nella diversa spazialità dell'informazione raccolta dai due sistemi, dal momento che il primo è di carattere areale distribuito, mentre l'informazione raccolta da un pluviometro è puntuale, poiché rappresenta il punto esatto in cui è installato e in cui esegue le misurazioni. Il dato radar rielaborato rappresenta una stima areale del campo di precipitazione con immagini raster composte da pixel di dimensione pari a 1-4 km², ben superiore alla densità delle reti pluviometriche, caratterizzate da circa una stazione ogni 50-100 km² [7], permettendo quindi di calcolare le quantità di precipitazione in modo spazialmente più accurato sull'intera superficie analizzata. Questa superiorità di risoluzione spaziale a cadenza temporale molto elevata (una immagine ogni 5-15 minuti) fa sì che il radar sia ormai diventato cruciale nel monitoraggio degli eventi in atto su scala spaziale e temporale molto ridotta, come nel caso del monitoraggio dei piccoli bacini liguri interessati da fenomeni molto rapidi quanto intensi[21] [19].

Un ulteriore aspetto fondamentale che distanzia l'informazione raccolta dalla rete pluviometrica da quella della rete radar, è che la prima consiste in una misura diretta, mentre la seconda è una stima. La differenza è sostanziale, in quanto un pluviometro misura fisicamente la precipitazione in corso, calcolando volumetricamente gli afflussi che raccoglie, mentre il radar stima la precipitazione derivandola dal segnale che riceve e misura. Questo fatto comporta l'elevato numero di dati incerti, errati o sottostimati della precipitazione, come riportato nel paragrafo precedente 1.4; d'altronde, come si evidenzia nella sezione 1.2, anche la rete pluviometrica non è esente da fonti di errore in fase di misurazione.

Studi recenti e la prassi operativa hanno permesso di superare i limiti osservativi dei singoli sistemi, radar e rete pluviometrica, attraverso l'uso congiunto delle misure e stime di pioggia raccolte. Questo risulta in un sistema di osservazione e misura integrato. Infatti, con il sistema radar è possibile osservare in maniera più capillare l'evento di pioggia in corso sia dal punto di vista spaziale che temporale, e la calibrazione delle stime radar con le misure dei pluviometri permette di ricostruire

la reale intensità osservata al suolo di tali eventi [22]. Questa è l'ipotesi fondante della tecnica del *Modified Conditional Merging* (MCM).

1.5.2 Breve introduzione al *Modified Conditional Merging* (MCM)

Il *Modified Conditional Merging* è una tecnica geostatistica che permette di integrare le osservazioni pluviometriche, basandosi sulle osservazioni dirette dei quantitativi di pioggia registrati al suolo, con le stime dei capi radar, che definiscono la struttura spaziale e temporale del capo di precipitazione ed in particolare la sua struttura di correlazione spaziale. L'MCM deriva direttamente dalla tecnica *Conditional Merging* [7]

Lo scopo del MCM è quello di poter ottenere una mappa di pioggia che risulti rappresentativa dell'evento di pioggia analizzato, e la realizza unendo la potenzialità delle due fonti di informazione radar e pluviometrica. L'MCM è in grado di definire la mappa di pioggia di un evento analizzato attraverso l'applicazione dell'algoritmo di interpolazione GRISO (riportato in appendice C), in cui però la struttura di correlazione spaziale associata a ciascun pluviometro è definita dal campo di precipitazione stimato dal dato radar [7]. Questa scelta permette di definire correlazioni locali nell'intorno di ciascuna stazione pluviometrica in grado di identificare e riprodurre le tipiche caratteristiche di intermittenza degli eventi di pioggia, sia di tipo convettivo che stratiforme. Questo processo si basa infatti sulla relazione che lega il campo reale di pioggia $Z(s)$ al campo di pioggia interpolato derivante dai pluviometri $G_K(s)$, considerando una varianza dell'errore di stima pari a $\varepsilon_G(s)$ (1.4).

$$Z(s) = G_K(s) + \varepsilon_G(s) \quad (1.4)$$

La stima del campo radar $R(s)$ può essere invece formalizzata a partire dall'interpolazione del dato radar estratto in corrispondenza dei pluviometri $R_K(s)$, tenendo in considerazione una varianza dell'errore di stima del campo radar pari a $\varepsilon_R(s)$ (1.5).

$$R(s) = R_K(s) + \varepsilon_R(s) \quad (1.5)$$

Dal momento che entrambe le componenti $R(s)$ e $R_K(s)$ sono note o calcolabili, è possibile definire la varianza dell'errore di stima del campo radar $\varepsilon_R(s)$ (1.6).

$$\varepsilon_R(s) = R(s) - R_K(s) \quad (1.6)$$

È così possibile definire una stima del campo di precipitazione reale a partire dalla stima radar, esplicitando la stima di precipitazione definita dal metodo MCM(1.7).

$$M(s) = G_K(s) + \varepsilon_R(s) \quad (1.7)$$

Si precisa che il campo stimato dal *merging* non coincide con quello reale, ma è associato ad un corrispettivo errore di stima.

$$E[Z(s) - M(s)] = E[\varepsilon_G(s) - \varepsilon(s)] \quad (1.8)$$

Lo schema concettuale dei passaggi operativi del metodo MCM è quindi il seguente, riportato anche in figura 1.4.

- Viene eseguito un iniziale filtro dei dati radar per ottenere mappe di stima non influenzate dagli errori tipici di acquisizione 1.4.
- Si procede alla costruzione della mappa di pioggia interpolata con il metodo GRISO dai valori della rete pluviometrica, utilizzando come correlazione spaziale locale l'informazione proveniente dall'analisi del campo radar.
- Quindi viene eseguita una seconda interpolazione, utilizzando il metodo GRISO a partire dai dati di stima radar estratti in corrispondenza dei pluviometri.
- Viene eseguita la differenza tra la mappa appena ottenuta e il dato di stima radar.
- La mappa della differenza, tra il dato radar interpolato sui pluviometri e la stima radar, viene infine sommata alla mappa di interpolazione del dato pluviometrico, rappresentando così il prodotto finale della stima di pioggia del metodo MCM.

Per una trattazione approfondita sul metodo CM si rimanda ad articoli specialistici quale [23], mentre per il MCM a [7].

1.6 Perché un indice di qualità della rete pluviometrica

È stato riportato nel capitolo 1.4 come la stima radar sia estremamente efficace nel monitoraggio in tempo reale di un evento di pioggia. Il radar permette infatti una localizzazione molto precisa della precipitazione, consente di rilevarne la natura e di monitorarne l'evoluzione spaziale e temporale. Tuttavia è stato sottolineato come la stima radar sia soggetta a numerose fonti di errore, in parte controllabili (sezione 1.4). In particolare, l'informazione quantitativa di una pioggia è spesso influenzata da numerosi fattori che non ne consentono una quantificazione precisa con la sola stima radar. È però comprensibile come una stima qualitativa, per

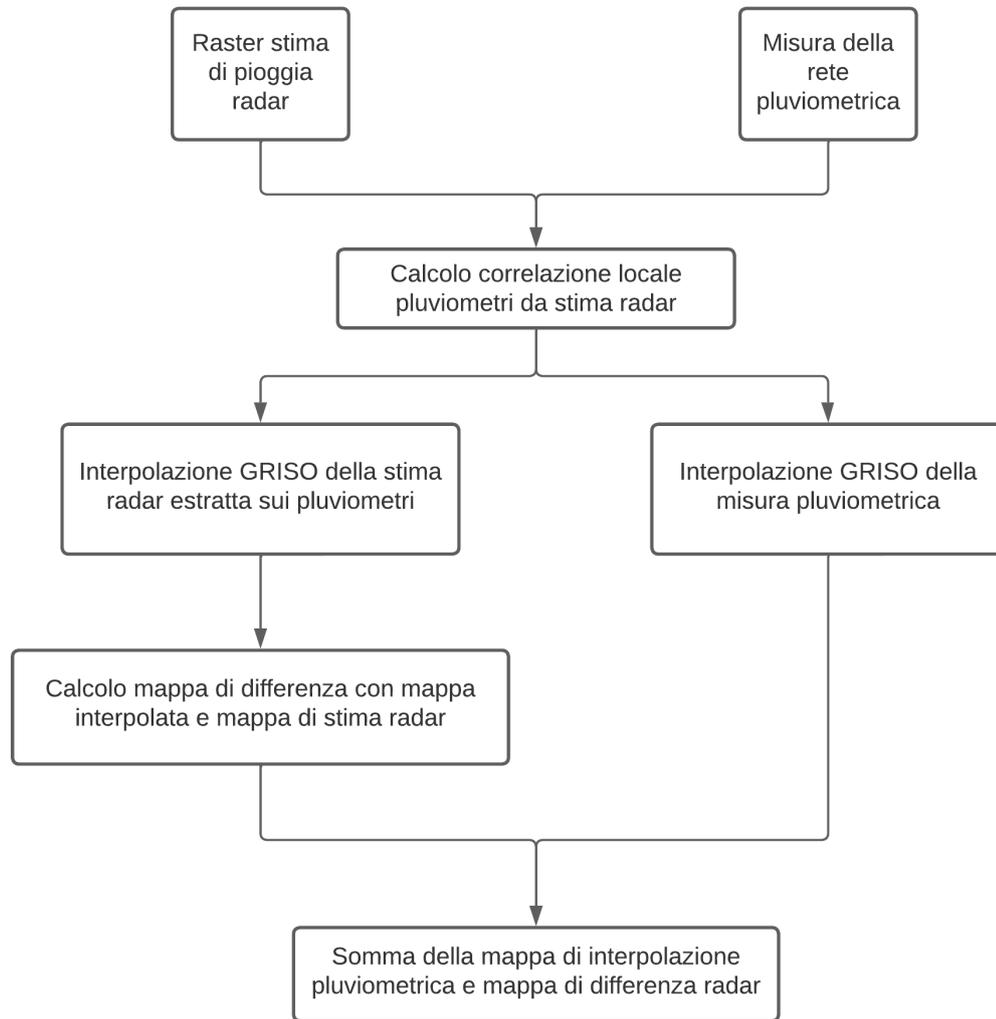


Figura 1.4: Lo schema concettuale del metodo del *Modified Conditional Merging* [7]

quanto precisa, non sia assolutamente sufficiente in campo idrologico, sia per il monitoraggio in tempo reale degli eventi, sia nel calcolo dei bilanci idrologici. È noto infatti che operazioni quali la redazione degli annali idrologici, che richiedono una misura precisa delle precipitazioni affluite, non possono prescindere da una buona stima del dato di pioggia. Allo stesso modo si è anche precisato che le sole misure pluviometriche non possano essere sufficienti a definire in modo accurato gli afflussi di un bacino, soprattutto se questo è molto eterogeneo. Inoltre, per quanto riguarda il monitoraggio in tempo reale di un evento possibilmente calamitoso

come quello di un'onda di piena improvvisa, il solo uso della rete pluviometrica sarebbe inaffidabile nel produrre stime immediate e spazialmente selettive delle aree interessate.

Per queste motivazioni sono stati sviluppati dei metodi che possono sopperire alle lacune dei sistemi radar e delle reti pluviometriche integrandoli tra loro in un unico prodotto finale di mappa di pioggia d'evento. Questi sistemi di *merging* producono una stima accurata sia in termini quantitativi grazie all'apporto del dato pluviometrico, che in termini di coerenza spaziale e temporale grazie all'apporto del dato radar, come visto nel capitolo 1.5. Dal momento che però questi metodi si basano sulla bontà del dato di partenza, e quindi sulla corretta ricezione del dato radar e del dato pluviometrico, è fondamentale poter assicurare che questi siano il più possibile affidabili. Come accennato nel capitolo 1.4, in ambito nazionale sono stati messi a punto alcuni algoritmi di controllo e correzione del dato radar, ma le reti pluviometriche risultano ancora poco indagate sotto questo aspetto.

Nella regione Liguria, in particolare, non è al momento operativo un sistema di controllo e definizione della qualità dell'informazione raccolta dalla rete regionale. Il proseguo di questo lavoro sarà quindi finalizzato proprio a questo obiettivo: definire e sviluppare una procedura automatizzata (come consigliato dalla WMO [24]) in grado di monitorare in tempo reale l'informazione raccolta dalle stazioni della rete pluviometrica ligure. Il fine è quello di ottenere rapidamente un'informazione sullo stato di affidabilità operativo della rete, ma anche un indice informativo quantitativo associato alle misure effettuate, che possa rendersi utile nelle successive ordinarie rielaborazioni idro-pluviometriche.

1.7 Il controllo qualità delle reti pluviometriche ed i sistemi esistenti

Prima di calarsi nell'analisi dello specifico caso ligure, è di primaria importanza eseguire una iniziale premessa sui sistemi di monitoraggio esistenti finalizzati alla definizione di un indice di qualità dell'informazione raccolta dalle reti pluviometriche.

La World Meteorological Organization (WMO) precisa che l'accuratezza dei dati raccolti è di importanza cruciale, soprattutto nell'ottica delle numerose analisi per le quali le misure eseguite potrebbero costituire la base di partenza, sia di uso locale che per programmi internazionali quali il *World Weather Watch Programme* [4]. La qualità dei dati è la misura di quanto questi servano allo scopo per cui sono stati prodotti; infatti, tutti i dati sono prodotti per uno scopo e la loro qualità è direttamente collegata alla soddisfazione dei requisiti di tale scopo [6]. Inoltre, sebbene la qualità dei dati riguardi la loro adeguatezza per l'uso specifico per il quale sono stati prodotti, questi possono essere utilizzati anche per altri usi, purché

possano soddisfare le esigenze operative di quest'ultimi [4]. Un esempio molto evidente è l'uso dei dati pluviometrici per la produzione dei valori di deflussi su scale mensili o annuali, sebbene l'obiettivo primario di una rete resti quello del monitoraggio degli eventi in corso.

Vi sono quindi due elementi chiave che assicurano la migliore qualità dei dati misurati e raccolti: la prevenzione di errori di misura e la loro successiva correzione [4]. È però comprensibile come la prevenzione di errori risulti più efficace della correzione degli stessi, in quanto è meno dispendiosa e meno sicura. Infatti, un dato affetto da errore potrebbe essere stato utilizzato in numerose applicazioni prima di essere corretto, ed intaccare così la qualità finale di molte analisi. È noto che la prevenzione non è in grado di evitare qualsiasi tipo di errore che comunque sarà sempre presente nell'acquisizione di un dato, soprattutto per serie molto numerose in termini di acquisizioni [4].

Le raccomandazioni del WMO possono essere quindi riassunte affermando che tutti i mezzi di monitoraggio, possibilmente automatizzati, degli errori dovrebbero essere utilizzati per riconoscerli in anticipo prima che possano influenzare le analisi ed i valori da queste processati [4]. Queste osservazioni, assolutamente ragionevoli, non sono state tuttavia accompagnate da direttive altrettanto efficaci in termini di processi operativi [25], ma dall'indicazione di soli controlli qualitativi ad una scala definita da 5 indicatori ("buono", "inconsistente", "dubbioso", "erroneo" e "mancante") [24]. In questi termini si inserisce il monitoraggio delle reti pluviometriche, che possono soffrire di alcune fonti di errore, quali quelle di natura sistematica (definite come primarie) che sono già state elencate in precedenza (sezione 1.2), e sono numerose le tecniche ormai consolidate che permettono di tenerle in considerazione e talvolta di risolverle. Ma vi sono alcune sorgenti che producono errori non sistematici, e quindi più difficili da individuare perché, a differenza di quelli sistematici, non si mantengono costanti nel tempo. Questi errori possono essere legati all'esposizione stessa della stazione pluviometrica [24], e per questa motivazione sono state illustrate precedentemente le modalità consigliate dal WMO per la loro installazione (sezione 1.2).

Una fonte di errore tipica di origine meccanica dello strumento corrisponde all'occlusione del sistema di raccolta e convogliamento al sistema a bilancia, che risulta così incapace di misurare un qualche afflusso, o è in grado di farlo in maniera estremamente ridotta ed insolitamente costante [24]. La parziale o totale occlusione può essere dovuta a particolato minerale, come polveri, o biologico, come foglie, insetti e residui erbacei [26]. Un totale o parziale blocco del pluviometro comporta quindi una stima erronea o addirittura un'assenza di misura dell'intensità e della durata di una pioggia.

Un'ulteriore fonte di errore, che verrà opportunamente affrontata nelle analisi di questa tesi, è costituita dalla parziale o totale ostruzione dell'orifizio di raccolta del pluviometro da parte della precipitazione nevosa durante gli eventi invernali

[24]. Questo fenomeno è in grado di alterare sia la misura del pluviometro durante l'evento di precipitazione in corso, che non è in grado di osservare alcun afflusso, ma anche la successiva fase di fusione nivale post-evento, in quanto l'afflusso che misurerà non risulta imputabile all'istante in cui lo sta misurando. Si sottolinea che questo fenomeno è ragionevolmente imputabile a pluviometri senza un sistema di riscaldamento integrato.

La WMO raccomanda comunque di seguire una scala gerarchica standard per il controllo delle reti, prediligendo il monitoraggio in tempo reale rispetto a quello non in tempo reale, sebbene la raccomandazione sia di eseguire un controllo di qualità sia *real-time* che nelle fasi di pre-processamento successive [24].

In letteratura vi sono numerosi ed efficaci sistemi di controllo della qualità della misura delle reti pluviometriche, tra cui alcuni molto recenti come [27], come anche sistemi di tipo qualitativo di controllo della rete, come [28]. Vi sono inoltre anche sistemi che, in seguito al riconoscimento dell'incorrettezza di una misura, tentano di correggerla, come ad esempio tramite tecniche geostatistiche di interpolazione della misura da stazioni vicine a quella considerata inattendibile [29], sebbene ciò non comporti un aumento dell'informazione raccolta. Recentemente è stato anche possibile ricorrere ad alcune tecniche di *machine learning* per il controllo in tempo reale e la correzione dei dati erranei, come nel caso del metodo proposto da [30], il quale vede la sua ossatura nello sviluppo di una rete neurale correttamente "allenata" e validata. Probabilmente, in un prossimo futuro verranno sviluppati algoritmi di controllo e correzione delle misure inattendibili delle reti pluviometriche basati sulla teoria delle *random forest*, che viene sempre più largamente impiegata nel settore delle risorse idriche [31] [32]. In generale, però, le procedure che sviluppano controlli di tipo qualitativo possiedono lo svantaggio che, per ciascuna misura raccolta, il risultato possa essere solo quello di poterla accettare come attendibile o di rigettarla [24]. Questo rischia di conservare misure poco attendibili se la soglia impostata per il rifiuto è troppo bassa, e di eliminare misure rappresentative per soglie troppo severe.

I sistemi di controllo quantitativi comportano quindi una migliore affidabilità ed utilità, poiché sono in grado di definire un indice di qualità univoco utilizzabile sia in fase di monitoraggio in tempo reale delle reti che in fase di elaborazione del dato, senza doverlo conservare o respingere in fase di misura e raccolta. Alcuni autori, tra cui [33], hanno già messo in pratica tale principio. Quanto appena descritto rappresenta il contesto scientifico attuale nel quale il sistema illustrato nei capitoli che seguono affonda le sue radici.

Capitolo 2

Il contesto ligure

2.1 Area geografica in analisi

«[...] in questi luoghi sono frequenti le accidentalità del terreno e le rupi a precipizio e i monti minacciosi s'innalzano nel cielo[...]»
(festo Avieno, *De Ora Maritima*, IV secolo d.C.)

La regione Liguria è situata nel nord-ovest della penisola italiana, compresa tra l'Appennino Ligure e le Alpi Liguri a nord e dal Mar Ligure a sud, con una superficie di circa 5'416 km².

La regione è definita da un'orografia complessa con rilievi scoscesi e altitudini superiori ai 2000 metri a ovest e ai 1800 metri a est. I rilievi scendono ripidamente verso il mare in media in soli 5-20 km e le valli corrono sia parallele che perpendicolari alla costa [34]. Di queste, le più interne si trovano nel bacino del fiume Po e non sono collegate idrograficamente al Mar Ligure, ma al Mar Adriatico.

Per questo motivo si è soliti parlare di bacini idrografici mediterranei per i primi e di bacini idrografici padani per i secondi.

La regione Liguria possiede una delle più alte percentuali di copertura forestale d'Italia e del resto dei Paesi mediterranei limitrofi, risultando superiore al 60% dell'intero territorio regionale (*Fonte INFC*). Infatti, i terreni appartenenti ai comuni montani sono di poco inferiori all'80% della superficie totale della regione (*Fonte Regione Liguria*), consentendo così una grande biodiversità e diversità ambientale.

2.1.1 Il regime climatico Ligure

La combinazione delle caratteristiche topografiche ed orografiche liguri offre una vasta varietà di zone climatiche costiere, interne e montane in un'area relativamente ristretta. Oltre a queste caratteristiche morfologiche, la circolazione atmosferica e le sue interazioni con l'arco montuoso alpino-appenninico ligure determinano

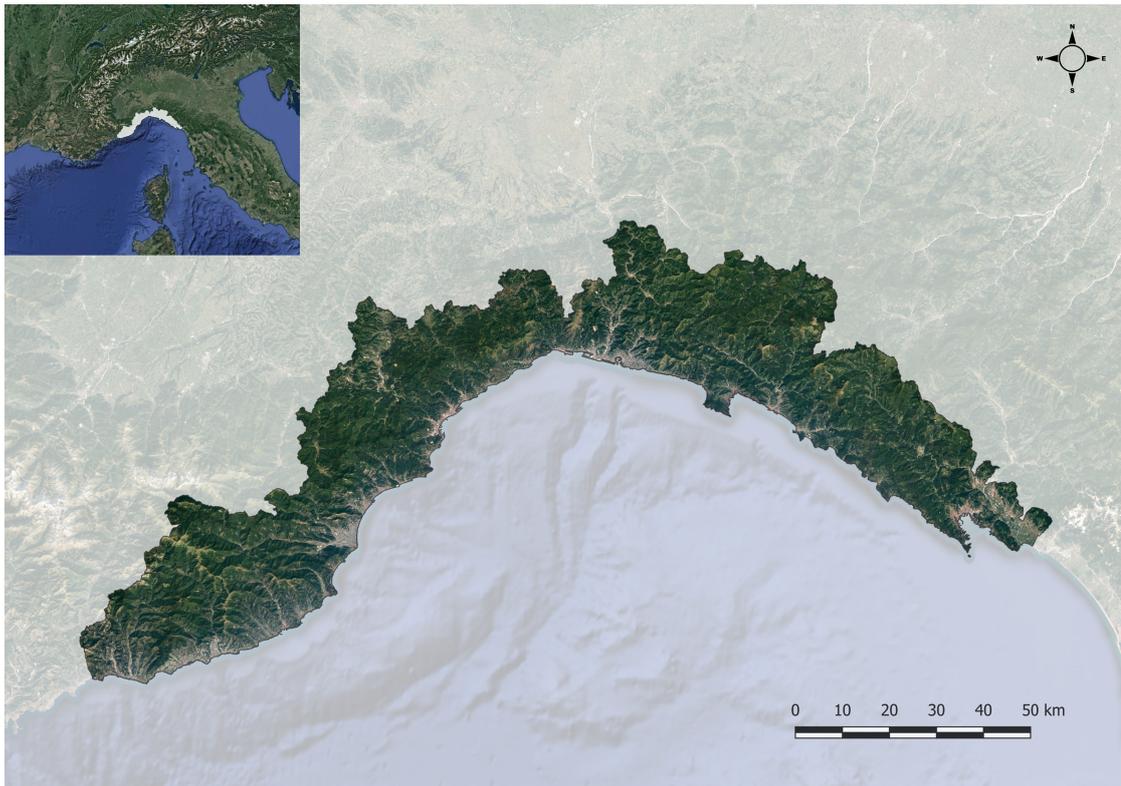


Figura 2.1: *Rappresentazione geografica della Liguria*

una differenziazione dei regimi climatici tra il Ponente, il Medio e il Levante della Liguria [35].

Queste differenze sono generalmente dovute al fenomeno ciclonico caratteristico del Golfo di Genova [36], un sistema di bassa pressione che si genera principalmente da ottobre ad aprile, come risultato dell'interazione tra masse d'aria fredde-umide atlantiche a monte dell'arco orografico alpino-appenninico ligure e masse d'aria mediterranee più calde a valle dei rilievi. Questa predisposizione climatologica ed il fattore orografico ligure risultano in una spiccata predisposizione a frequenti ed intense piogge. È infatti noto che regioni a ciclogenesi controllata dalla topografia sono soggette ad eventi meteorologici più intensi [37].

È però fondamentale evidenziare che gli effetti della ciclogenesi dei fenomeni liguri non si limitano ad interessare il solo territorio regionale, allargandosi all'intero continente europeo. Infatti alcuni studi, tra cui [38] e [39] hanno permesso di effettuare una analisi climatologica oggettiva dei fenomeni ciclonici che si formano nella regione del Mediterraneo, concludendo che la regione del Golfo di Genova ne genera la maggior parte.

In particolare, soprattutto nel Golfo di Genova nascono e si sviluppano i cicloni Vb, il cui percorso tipico è associato a precipitazioni estreme e inondazioni improvvise su Germania, Austria, Svizzera, Repubblica Ceca e Polonia. [39]

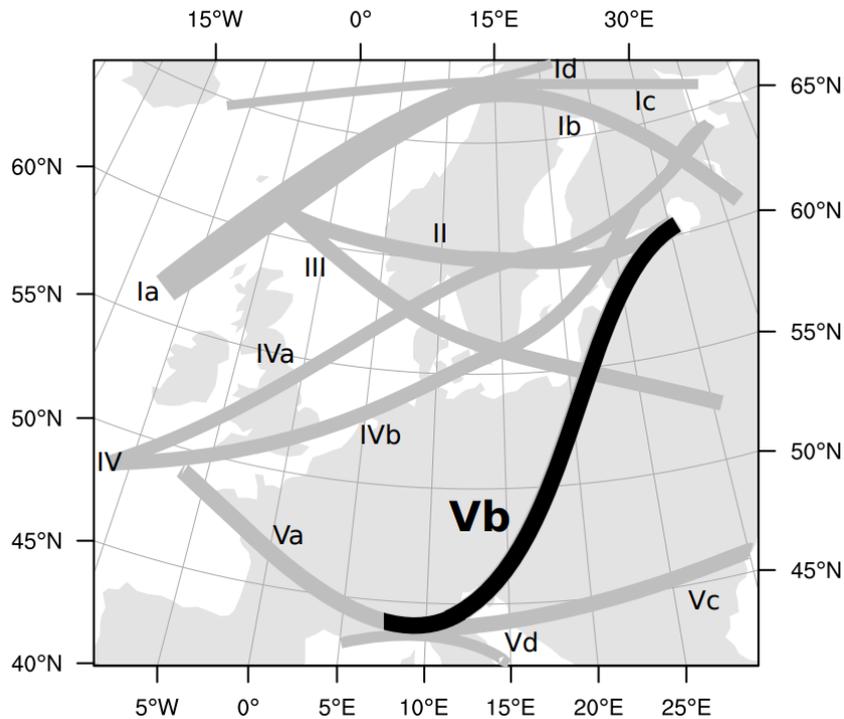


Figura 2.2: La traccia tipica dei cicloni Vb [39]

L'origine dei cicloni Vb è il Golfo di Biscaglia, il Mar Balearico e il Mar Ligure, sebbene nella maggior parte dei casi questi si sviluppano o si intensificano proprio in prossimità del Golfo di Genova [39], dove avviene l'assorbimento delle masse umide marine.

Il ciclone prosegue nel suo avanzamento verso est passando per l'Italia e il Mar Adriatico, prima di virare verso nord e raggiungere il Mar Nero o la regione di San Pietroburgo, e lungo questo percorso le precipitazioni sono tipicamente indotte dall'orografia incontrata dalle masse umide. Si noti infine che un ciclone Vb non è normalmente associato ad intense ed abbondanti precipitazioni sul versante meridionale delle Alpi, le quali possono già essere innescate dalla sola ciclogenesi di Genova [40][41][38], di cui in seguito verrà effettuato un approfondimento.

"Il ciclone genovese"

Di seguito si riporta un passaggio tratto da *"Il clima che cambia l'Italia"* di Roberto Mezzalama, utile per fare un iniziale inquadramento sul fenomeno della bassa pressione ligure, il cosiddetto *Genoa Low*. « *Nel Nord Italia c'è un luogo particolare nel quale si formano importanti cicloni, il Golfo di Genova. In autunno i fronti freddi provenienti dall'Atlantico che attraversano le pianure della Francia si dividono intorno al massiccio centrale in un braccio principale, che si muove verso est passando a nord delle Alpi, e uno secondario che si insinua verso sud e arriva sul Mediterraneo attraverso la "porta di Carcassone". Qui si incontra l'aria calda che sovrasta il Mediterraneo, che ha accumulato calore per tutta l'estate e, per una combinazione di fattori morfologici e altri fattori fisici, inizia a formare un ciclone che ruota in senso antiorario. Ad aumentare la potenza del fenomeno, talvolta dalla Valle del Rodano arriva nel Mediterraneo una ulteriore corrente fredda, quella che provoca il famoso "Mistral". Il "motore" di questi cicloni è tanto più potente quanto più grande è la differenza di temperatura tra l'aria che sovrasta l'alto Tirreno e l'aria che arriva da nord-ovest.* » [42] Il sistema di bassa pressione ligure innesca quindi venti umidi sud-occidentali che soffiano verso monte, lungo l'Appennino Ligure orientale, mentre la rotazione ciclonica determina correnti nord-orientali più fredde e secche dalla pianura padana, lungo le Alpi Liguri occidentali [34].

Inoltre il Mar Mediterraneo svolge il ruolo di grande riserva di calore ed umidità, una sorgente dalla quale sistemi atmosferici convettivi e baroclinici traggono parte della propria energia [43]. L'interazione tra i fenomeni convettivi originati dalla sorgente calda mediterranea e gli improvvisi innalzamenti orografici prossimi alla costa sono una delle cause principali di produzione di intense piogge [43]. Spesso, infatti, lo scenario appena descritto può produrre piogge che in un'ora sono in grado di superare la media mensile, ed in un giorno raggiungere l'intera media annuale.

Regime ligure delle precipitazioni

Il levante della regione risulta essere più piovoso del ponente sia in termini di cumulate ma anche in termini di giorni piovosi, massime precipitazioni giornaliere, maggior numero di giorni piovosi consecutivi e minor numero di giorni secchi consecutivi [35]. Inoltre, come riportato dall'*Atlante Climatico della Liguria* [35], per l'ultimo trentennio analizzato (1981-2010) si è osservato, rispetto al trentennio 1861-1990, che:

- La stagione autunnale è stata più piovosa, sia in termini di cumulate, di giorni piovosi, di numero massimo di giorni piovosi consecutivi e di intensità di precipitazione giornaliera.

- Le altre stagioni si presentano per il trentennio 1981-2010 più secche rispetto a quello 1861-1990.

Nello specifico si è osservato che, con un'analisi sugli estremi di precipitazione, le aree maggiormente colpite sia in termini di frequenza che di intensità sono quelle al centro della regione. In particolare, esse coincidono con la quasi totalità della provincia di Genova, ad esclusione del Tigullio e della Val d'Aveto. Come si osserverà nel capitolo 2.1.2, questa è anche la zona maggiormente esposta per questioni idro-morfologiche a fenomeni di *flash-floods*, che aggiungendosi alle caratteristiche climatologiche appena citate la rendono un'area estremamente vulnerabile. A livello stagionale, l'autunno è la stagione in cui si osserva il maggior numero di eventi piovosi [38]. Il 54% degli eventi etichettati come straordinari si è verificato infatti in questa stagione, e la percentuale raggiunge l'80% se si considerano i primi venti eventi, dei quali solo quattro si verificano in: primavera (2), gennaio (1) e fine agosto (1) [38]. Inoltre, mentre le condizioni a grande scala sono più comuni dall'autunno alla primavera, con l'intrusione di grandi masse umide generate nel bacino del Mediterraneo la stagionalità di intensi fenomeni locali si concentra nel periodo tra l'estate e l'autunno, in quanto la temperatura superficiale del mare e le temperature dell'aria più elevate aumentano significativamente la disponibilità di umidità e quindi il potenziale motore di eventi estremi localizzati [38].

Regime ligure delle temperature

La distribuzione delle temperature mostra un andamento opposto, e quindi il ponente risulta più mite del levante, sia in termini medi che di estremi termometrici. Per quanto riguarda l'escursione termica, i gradienti maggiori si osservano tra le zone costiere sia di ponente che di levante e nelle aree interne. Infatti, le zone costiere risentono fortemente dell'inerzia termica del Mar Ligure, e presentano quindi un campo di temperature con differenze minori tra massimi e minimi giornalieri [35].

2.1.2 I bacini idrografici liguri

Come anticipato, i bacini idrografici liguri si dividono in costieri o tirrenici, se sfocianti nel Mar Ligure, oppure in bacini padani se alimentano il fiume Po. La particolarità della morfologia ligure fa sì che la maggior parte dei bacini idrografici presentino dimensioni ridotte e pendenze molto elevate. Queste due caratteristiche si aggiungono alla numerosità delle aste minori liguri (si osservi la figura 2.4), comportando così le caratteristiche tipiche che causano le temute *flash floods* [43]. Il territorio ligure presenta una elevatissima eterogeneità geologico-strutturale che, in termini generali ed adatti all'inquadramento geografico dello studio, può essere ripartita nelle seguenti tre zone [44]:

- Ponente ligure con un substrato prevalentemente flyschoidale.
- Parte centrale della regione a substrato prevalentemente di natura intrusiva-metamorfica, con il Gruppo di Voltri ed il massiccio cristallino del savonese.
- zona centro-orientale definita dalla presenza della Linea Sestri-Voltaggio e da una marcata eterogeneità litologica.

Nello specifico, tra i bacini mediterranei, i torrenti Aquila, Fiumara, Segno, Varenna e Polcevera presentano litologie estremamente eterogenee. Inoltre, il bacino dell'Aquila presenta una ripartizione netta del substrato, metamorfico nella parte settentrionale e calcareo carsificato in quella meridionale (il famoso calcare di Finale, tanto apprezzato dagli alpinisti liguri). Di seguito si riportano le classi in cui sono suddivisi i bacini idrografici della regione Liguria, a seconda dell'estensione superficiale di ciascun bacino idrografico. La distinzione deriva da tre differenti classi definite dalla stessa ARPAL [45], in base alla diversa risposta idrologica dei bacini:

- Bacini piccoli, con estensione minore di 15km^2 .
- Bacini medi, drenanti una superficie compresa tra 15 e 150km^2 .
- Bacini grandi, con estensione superiore ai 150km^2 .

Com'è possibile visualizzare sulla rappresentazione cartografica delle classi di bacino 2.3, quelli considerati come grandi sono estremamente pochi, e sono i bacini idrografici dei seguenti corsi d'acqua.

- Per il versante costiero: il Fiume Roja, Il Torrente Nervia, il Torrente Argentina, il Fiume Centa, il Torrente Entella, il Fiume Vara ed il Fiume Magra.
- Per il versante padano: le Bormide di Millesimo e Spigno, il Torrente Scrivia, il Fiume Trebbia ed il Torrente Aveto.

I corsi d'acqua non attribuiti a bacini classificati "grandi", ma comunque con un bacino di alimentazione superiore ai 100 km^2 sono:

- Per il versante costiero: il Torrente Impero, il Torrente Polcevera ed il Torrente Bisagno.
- Per il versante padano: il Torrente Tanaro, il Torrente Erro, il Torrente Orba ed il Torrente Stura.

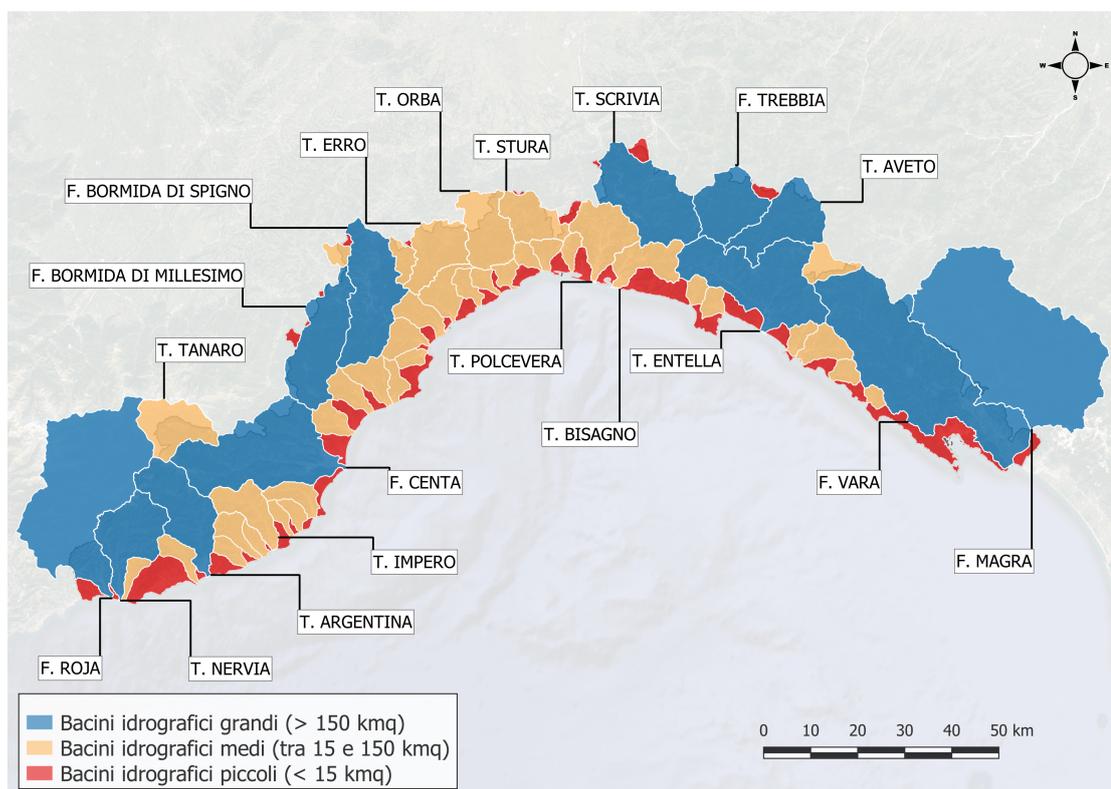


Figura 2.3: Rappresentazione cartografica delle classi di bacino [45] per i bacini idrografici liguri

A livello idromorfologico, i bacini costieri possiedono generalmente una forma allungata e perpendicolare alla costa, eccezion fatta per i bacini del torrente Bisagno e del torrente Entella che sono orientati parallelamente alla costa. Quelli sul levante che non presentano una forma allungata sono i torrenti Quiliano, Arrestra, Leiro e Cerusa.

Complessivamente la superficie coperta da bacini grandi è di circa 4'725 kmq, quella dei bacini medi è pari a circa 1'903 kmq mentre la totalità dei bacini piccoli copre una superficie pari a circa 682 kmq. È di fondamentale importanza osservare anche il seguente grafico riassuntivo delle caratteristiche idrologiche dei bacini liguri (figura 2.4), dal quale si desume immediatamente che, sebbene di ridottissima estensione, il numero di bacini di tipo piccolo è assolutamente significativo per comprendere la risposta idrologica del territorio ligure.

Le classi di bacino sono infatti uno strumento fondamentale per prevedere in fase di monitoraggio idrologico gli effetti al suolo previsti a seconda del tipo di evento atteso. Di seguito si riporta in forma schematica, in figura 2.5, il comportamento delle diverse classi di bacino in funzione delle caratteristiche delle precipitazioni

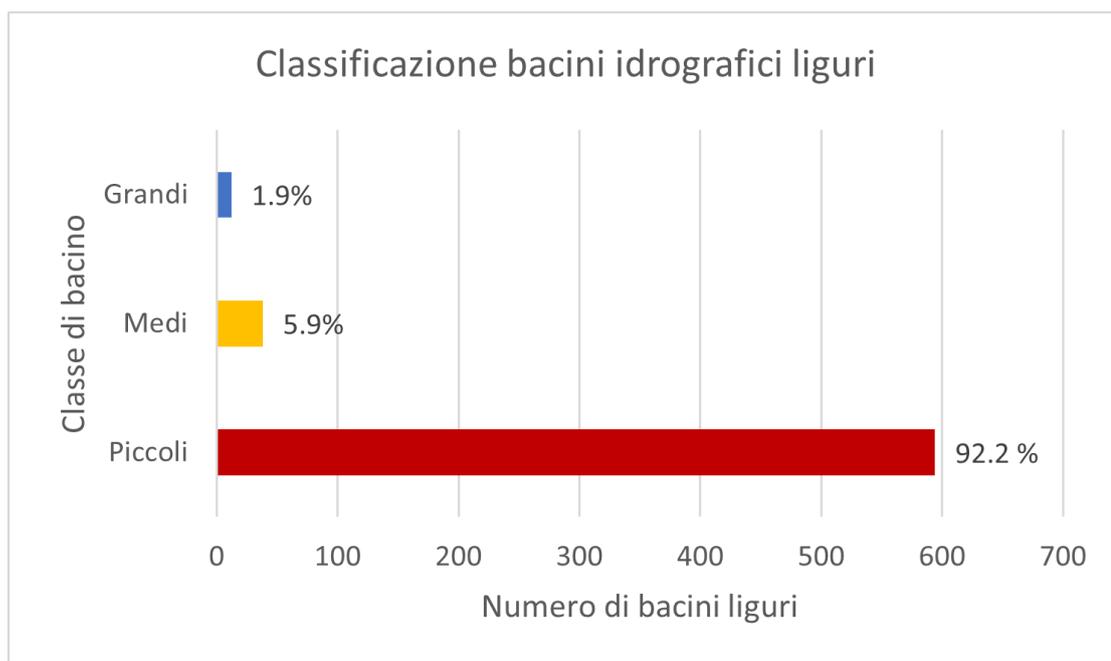


Figura 2.4: *La distribuzione dei bacini idrografici liguri*

che vi insistono [45].

Questa rappresentazione è di grande importanza per completare il quadro della fenomenologia idrologica ligure. È infatti fondamentale comprendere come diversi tipi di evento (piogge brevi ma intense, piogge forti ma di media durata, piogge moderate per tempi prolungati) possano portare alla crisi e quindi ad una possibile esondazione di classi di bacino ben distinte.

Dal momento che il numero di “piccoli bacini” rappresenta la classe di bacino più numerosa sul territorio regionale, e poiché è stato osservato che l’evento pluviometrico in grado di metterla in crisi è assolutamente compatibile e riscontrabile con le caratteristiche pluvio-climatologiche della regione (eventi brevi ed intensi, come visto nella sezione 2.1.1), il monitoraggio accurato di questa delicata categoria idrografica risulta cruciale. Si specifica infatti che la classe idrografica dei cosiddetti “piccoli bacini” comprende le reti idrografiche minori, ma anche canali irrigui, reti di smaltimento delle acque piovane e reti fognarie. «Tali reti minori è solito che interferiscano con elementi antropici sensibili in ambiti urbani e, vista la loro tipica ridotta dimensione ed elevata pendenza, possono andare in crisi repentinamente e determinare improvvise condizioni di rischio, come nel caso di piogge localizzate, intense e di breve durata»[45].

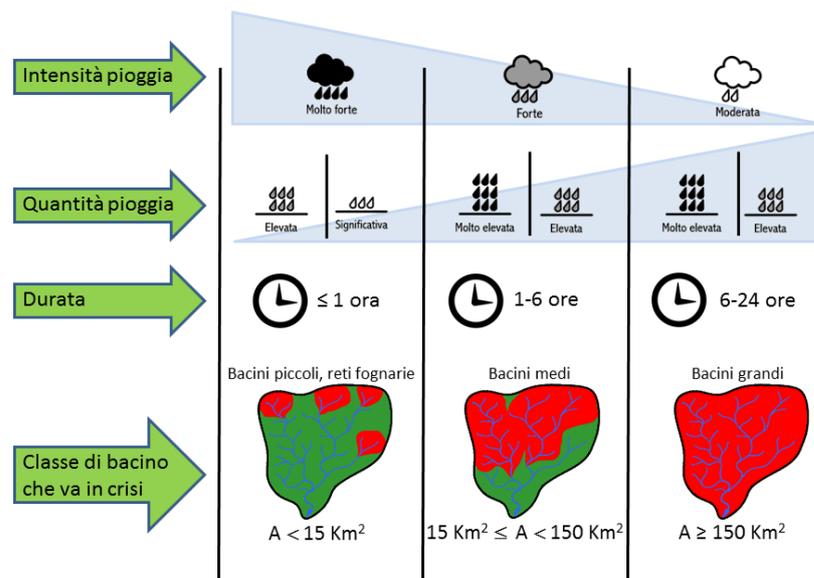


Figura 2.5: La risposta idrologica dei bacini idrografici liguri a seconda del tipo di evento [45]

Capitolo 3

OMIRL: Il monitoraggio idro-meteorologico ligure

3.1 La rete di monitoraggio OMIRL

3.1.1 Introduzione generale

In questo capitolo viene data una breve descrizione della rete di monitoraggio meteo idrologico della Regione Liguria (OMIRL), strumento del Centro Funzionale Meteo-Idrologico di Protezione Civile regionale (CFMI-PC) [46]. L'OMIRL è il contesto operativo nel quale prende vita questo lavoro, essendone la fonte dei dati di sviluppo e calibrazione nonché il destinatario finale delle rielaborazioni.

La rete OMIRL è composta da un elevato numero di stazioni di monitoraggio a terra, che permettono di osservare le seguenti variabili fisiche di interesse idro-meteorologico:

- Precipitazione [mm].
- Temperatura [°C].
- Livelli idrometrici [m].
- Vento [km/h].
- Umidità dell'aria [%].
- Eliofanie [min].
- Radiazione solare [W/m²].
- Bagnatura fogliare [%].

- Pressione atmosferica [hPa].
- Stato del mare [m].
- Livelli nivometrici [cm].

Come si è potuto notare, le grandezze monitorate dalla rete sono molte, sebbene solo le variabili di precipitazione e temperatura siano raccolte dalla totalità delle stazioni, mentre le stazioni dotate della strumentazione che misurano le altre variabili citate sono nettamente in numero inferiore. Di seguito si riporta un grafico riassuntivo (figura 3.1) delle variabili fisiche misurate dalla rete.

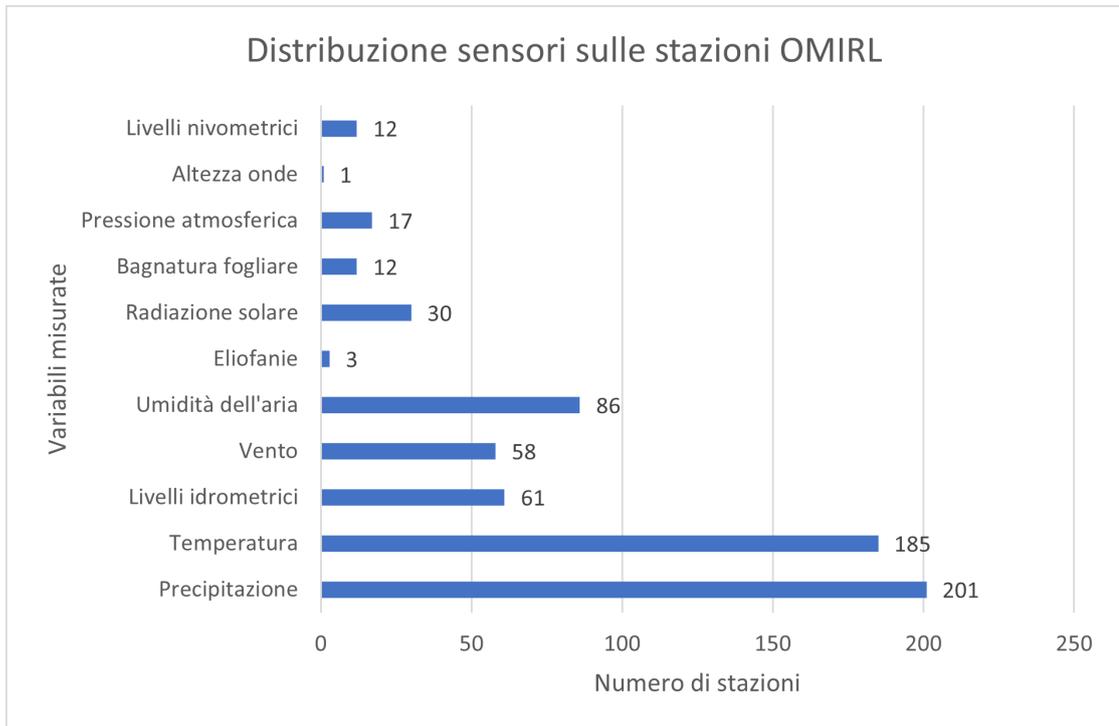


Figura 3.1: *Distribuzione dei sensori installati sulle stazioni OMIRL*

Dal momento che le variabili utilizzate per le rielaborazioni ai capitoli 4 e 5 sono le registrazioni di precipitazione e di temperatura, si riporta di seguito la rappresentazione geografica delle stazioni pluviometriche (figura 3.2) e termometriche (figura 3.3), mentre si rimanda alla pagina ufficiale OMIRL per la visualizzazione cartografica delle stazioni in grado di misurare le altre variabili citate. Inoltre, si riporta l'elenco dettagliato delle specifiche geografiche e di codifica delle stazioni pluvio-termometriche in appendice E di questo lavoro.

Come si può intuire vi è una forte sovrapposizione tra le due rappresentazioni geografiche appena descritte; infatti, la quasi totalità delle stazioni pluviometriche

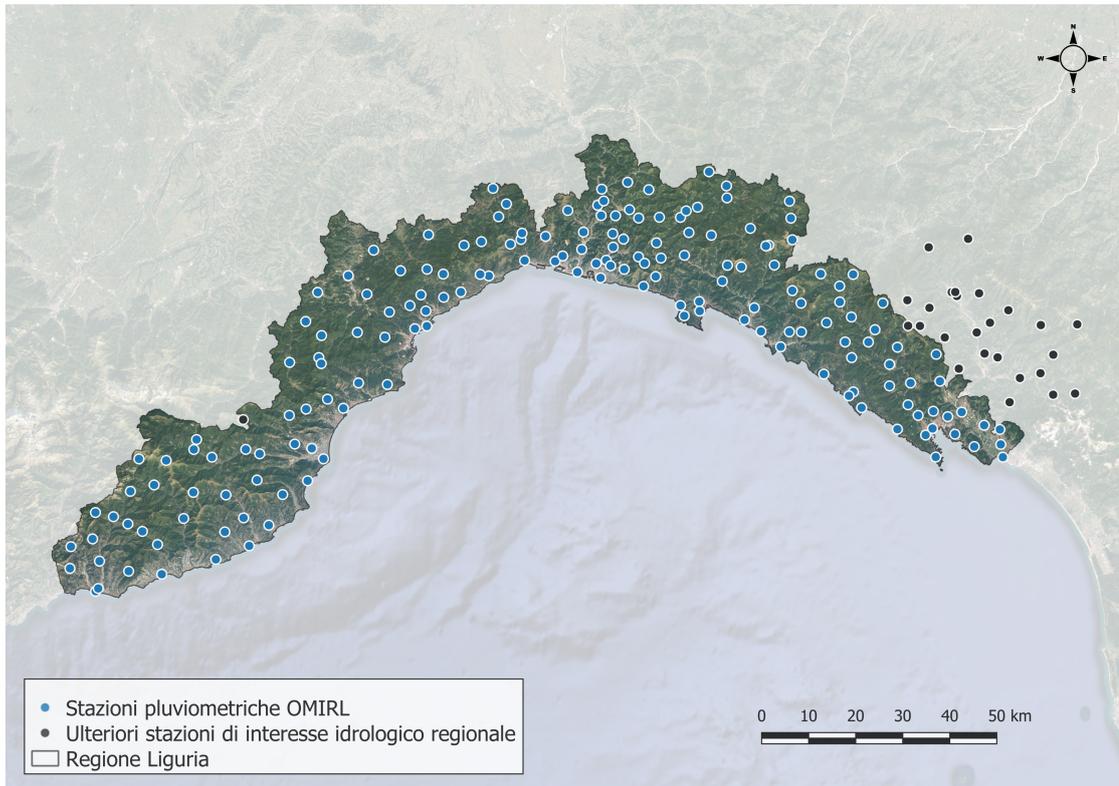


Figura 3.2: *Rappresentazione geografica delle stazioni pluviometriche*

è dotata di sensore termometrico. Questa è una caratteristica fondamentale che è stata sfruttata per la messa a punto del sistema di monitoraggio in tempo reale della rete pluviometrica OMIRL, oggetto di questa tesi. La densità spaziale delle stazioni liguri è molto elevata, pari ad una stazione ogni 32 km^2 . Questo dato è decisamente superiore alla media della rete pluviometrica nazionale, pari ad una stazione telemetrica ogni $50\text{-}100 \text{ km}^2$ [7], fatto che può derivare dalla complessità della fenomenologia meteorologica ligure, che può assumere caratteri decisamente localizzati.

Si cita ad esempio il caso estremo dell'evento di pioggia del 4 novembre 2011, culminato con la tragica alluvione di Genova. In quell'occasione il pluviometro localizzato sul Rio Fereggiano registrò un valore di pioggia maggiore del 30% di quello localizzato circa 2 km più a valle, sul Torrente Bisagno [43].

È sicuramente necessario rispondere alla domanda che potrebbe sorgere dall'osservazione delle carte appena riportate (figure 3.2 e 3.3), ovvero perché vi siano delle stazioni di misura che non sono presenti all'interno del territorio ligure, ma si trovano in quello toscano. Spesso confini idrologici ed amministrativi non coincidono, e questo ne è un chiaro esempio. Infatti, il bacino del fiume Magra,

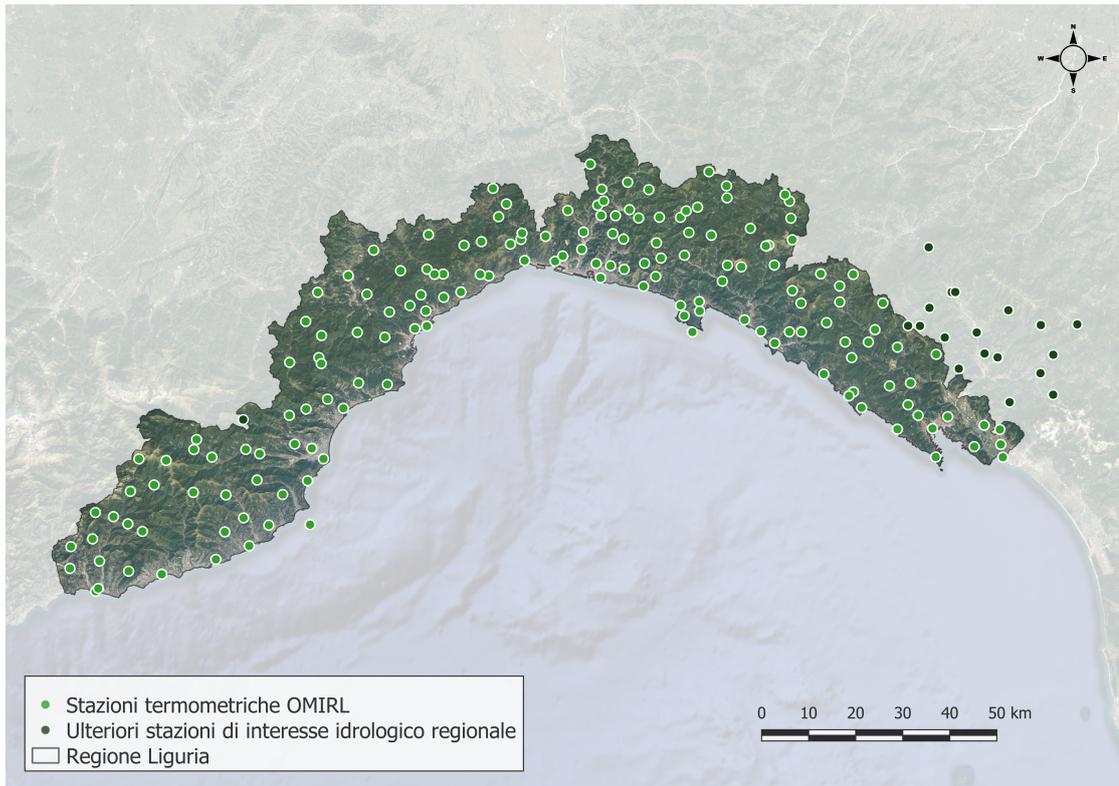


Figura 3.3: *Rappresentazione geografica delle stazioni termometriche*

appartenente alla provincia di Massa e Carrara, vede il suo tratto terminale in provincia di La Spezia, dove le dinamiche pluviometriche del bacino toscano sono di estremo interesse per il monitoraggio del regime idrologico del Magra ligure.

Proprio per quest'ultima motivazione, il monitoraggio idro-meteorologico ligure, che si basa sulla definizione delle cinque zone di allertamento (A, B, C, D, E) [45], nella sua fase operativa vede la definizione di una zona di allertamento aggiuntiva volta a colmare il divario amministrativo da quello idrologico. Viene così individuata la zona M, che mira appunto a monitorare e, in caso di evento intenso, allertare l'area interessata da una possibile piena del fiume Magra.

3.1.2 Le specifiche della rete pluviometrica

In questa sezione si fa riferimento alle specifiche tecniche delle stazioni pluviometriche installate per la rete OMIRL, grazie a gentile concessione dell'ufficio Reti di ARPAL. La rete pluviometrica è composta nella sua totalità da stazioni con dispositivo di misura a bascula, delle quali il 40% sono di tipo ETG con bocca di raccolta da 1000cm^2 [47] e il 60% di tipo MTX, di cui due stazioni sono dotate di

una bocca di raccolta da 400cm² [48] mentre le restanti hanno una bocca di raccolta da 1000cm² [49]. La scelta di equipaggiare le due stazioni di Cavi di Lavagna e Monte Beverone con un pluviometro da soli 400cm² è dovuta alla mancanza di un sufficiente spazio disponibile in sito per l'installazione di strumenti di dimensioni maggiori. La totalità delle stazioni, sia ETG che MTX, sono progettate secondo gli standard definiti dalle indicazioni WMO, come riportato precedentemente nella sezione 1.2. In particolare, le stazioni sono dotate di algoritmi di correzione sviluppati in fase di calibrazione che permettono di ottenere una misura non falsata dell'intensità della pioggia in corso.

Inoltre sono previsti per ciascuna stazione deflettori per evitare che i flussi d'aria che la investono possano interferire eccessivamente con la misura, sebbene restino validi e prioritari gli accorgimenti WMO su una corretta scelta del sito d'installazione. Si rimarca il fatto che le stazioni ETG prevedono la loro messa in opera su basamenti cementizi, sebbene questo sia in disallineamento con i suggerimenti WMO per evitare il fenomeno di *in-splashing*. Anche l'aspetto di assoluta verticalità delle strumentazioni è rimarcato dalle specifiche di progetto dei pluviometri, come d'altronde è raccomandato dalle norme WMO.

Infine, è anche sottolineata la possibilità di installare le tre varianti di strumentazione ETG e MTX con sistema di riscaldamento interno, per la misura di precipitazioni sia in fase liquida che nevosa. In mancanza di questo sistema opzionale, la stazione sprovvista misurerà l'afflusso nevoso in forma liquida solo nel momento della sua fusione. È importante rimarcare che le stazioni OMIRL sono per lo più sprovviste di sistema di riscaldamento del pluviometro, aspetto che in fase di operatività può portare ad intasamenti temporanei del sistema di misura, come si vedrà nel capitolo 5.

Per quanto riguarda l'aspetto manutentivo degli strumenti, in fase progettuale è stata premiata la facile e rapida accessibilità degli organi interni e soprattutto del sistema a bascula. È infatti consigliata, secondo le indicazioni del produttore, una loro manutenzione ad una cadenza almeno semestrale per l'eliminazione di componente organica e cristallina che ne potrebbe compromettere la fase di misura, occludendo il sistema basculante. Inoltre, come consigliato da norme WMO, è prevista la ricalibrazione in campo del sistema di misura a bascula su cadenza biennale.

La alimentazione di ciascuna stazione avviene tramite una batteria da 12V, alimentata da pannelli solari, e la trasmissione delle misure è eseguita dalla centralina tramite un sistema di telefonia mobile 2G/3G/4G (GPRS) e via radio, per una motivazione di conservatività e ridondanza. In seguito, il dato grezzo raccolto in un Centro di Elaborazione Dati (CED) viene inserito in due piattaforme interne di ARPAL, il sistema di *MeteoWES* e in un *database Oracle* interno. In particolare, *MeteoWES* è utilizzato soprattutto per il monitoraggio dello stato della rete, mentre OMIRL rappresenta la piattaforma che accede al DB interno. In appendice E sono

riportate le specifiche tecniche dei tre tipi di misuratori pluviometrici installati per la rete OMIRL.

3.1.3 Il sistema di monitoraggio attuale

Come anticipato nel sottoparagrafo precedente, l'attuale monitoraggio dello stato della rete OMIRL si basa sull'osservazione della piattaforma MeteoWES, sulla piattaforma OMIRL e sulla successiva compilazione di un apposito registro di possibili anomalie e problematiche riscontrate, definito "Registro Reti". Questa operazione avviene su base giornaliera, seguendo una *checklist* predefinita, basata essenzialmente su un primo controllo speditivo sull'insieme delle stazioni (controllo di 1° livello) e su una successiva procedura più dettagliata delle singole misurazioni di ciascuna stazione (controllo di 2° livello).

Il controllo di 1° livello monitora primariamente lo stato di trasmissione della rete, eseguendo un controllo di tipo *Keepalive* su ciascuno dei quattro ripetitori radio regionali. Questi sono situati sul Monte Bignone (IM), sul Monte Beigua (SV), sul Monte Fasce (GE) e sul monte San Nicolao (SP), la cui rappresentazione cartografica è riportata nel capitolo seguente (figura 3.4). Il controllo di tipo *Keepalive* si basa sulla definizione del percorso radio più performante seconda una statistica giornaliera derivante da una serie di prove di trasmissione/ricezione sui quattro apparati.

Il controllo di 2° livello è volto ad una analisi più accurata sui riepiloghi giornalieri, settimanali e mensili delle variabili delle stazioni individuate come sospette o difettose dal controllo di 1° livello. Particolare attenzione è posta nel monitorare lo stato di tensione della batteria di ciascuna stazione, in quanto al di sotto del valore di 11 V esse non sono in grado di trasmettere le misure eseguite. Nel caso specifico del controllo di 2° livello sulle stazioni pluviometriche, questo prevede il monitoraggio delle misure cumulate di ciascuna stazione su base giornaliera ed il suo confronto da mappe di precipitazione interpolata su scala settimanale e mensile. Si sottolineano le seguenti cause di sottostima sospettate come probabili nel controllo di 2° livello:

- Occlusione dei pluviometri.
- Sottostima dovuta a forti venti per stazioni in quota.
- Ostruzione della bocca dello strumento per neve.

Lo schema attuale di controllo di queste possibili criticità dell'acquisizione strumentale, non è automatizzato, ma affidato a successivi controlli incrociati con altre variabili correlate con le problematiche sospettate (misure anemometriche, valori termometrici e misure nivometriche) o all'analisi su supporto cartografico delle variabili misurate definite su base areale.

Alla verifica delle possibili problematiche di acquisizione della misura pluviometrica appena citate, si aggiunge il controllo di possibili malfunzionamenti dovuti alla trasmissione del dato.

3.2 La rete radar in Liguria

Il radar gestito dalla Regione Liguria fa parte del mosaico radar del Dipartimento Centrale di Protezione Civile [17]. In particolare, però, il sistema radar in grado di stimare le precipitazioni in corso sul territorio regionale è l'apparecchiatura di Monte Settepani (SV). Inoltre, in virtù del progetto *PROTERINA-3Évolution* [22], il dato radar raccolto è integrato dalle stime dell'apparecchiatura installata presso Mont Vial (Nizza) in territorio nazionale francese, con le quali sono mosaiccate le stime dell'impianto di Monte Settepani. Si veda [50] [22] per una trattazione sulla mosaicatura del dato radar.

L'apparecchiatura radar di Monte Settepani rientra nella tipologia più comune per le misure meteoidrologiche sul territorio nazionale, in quanto è dotata di una frequenza di trasmissione in banda C. Il sistema di Mont Vial ha invece una frequenza di emissione del segnale in banda X, appartenendo quindi alla tipologia di radar meteoidrologici più compatti e quindi trasportabili, che posseggono però un minor raggio di azione, come visto nella sezione 1.4.2. Entrambi gli impianti sono dotati di sistema di trasmissione polarimetrico e doppler, e hanno quindi la capacità di riconoscere la natura della precipitazione in corso e l'evoluzione spaziale del percorso compiuto dalle idrometeore [22].

Si riporta quindi la localizzazione geografica, in figura 3.4, degli apparati di Monte Settepani e di Mont Vial, mentre si rimanda all'appendice per una tabella riassuntiva delle loro specifiche tecniche. Nella rappresentazione cartografica si possono osservare anche gli apparati radio utilizzati per la trasmissione delle misure della rete pluviometrica.

3.3 Caratteristiche dei dati OMIRL

In questa sezione si illustrano le specifiche dei dati utilizzati nelle rielaborazioni successive, ovvero l'informazione proveniente dalle stazioni meteo-idrologiche della rete OMIRL e le immagini raster rappresentanti le stime di pioggia delle stazioni radar.

3.3.1 Struttura dei dati provenienti dalle stazioni

Le misurazioni delle stazioni meteorologiche sono trasmesse tramite connessione GPRS e radio al CED, ed in seguito al DB *Oracle* di ARPAL. Per poter quindi

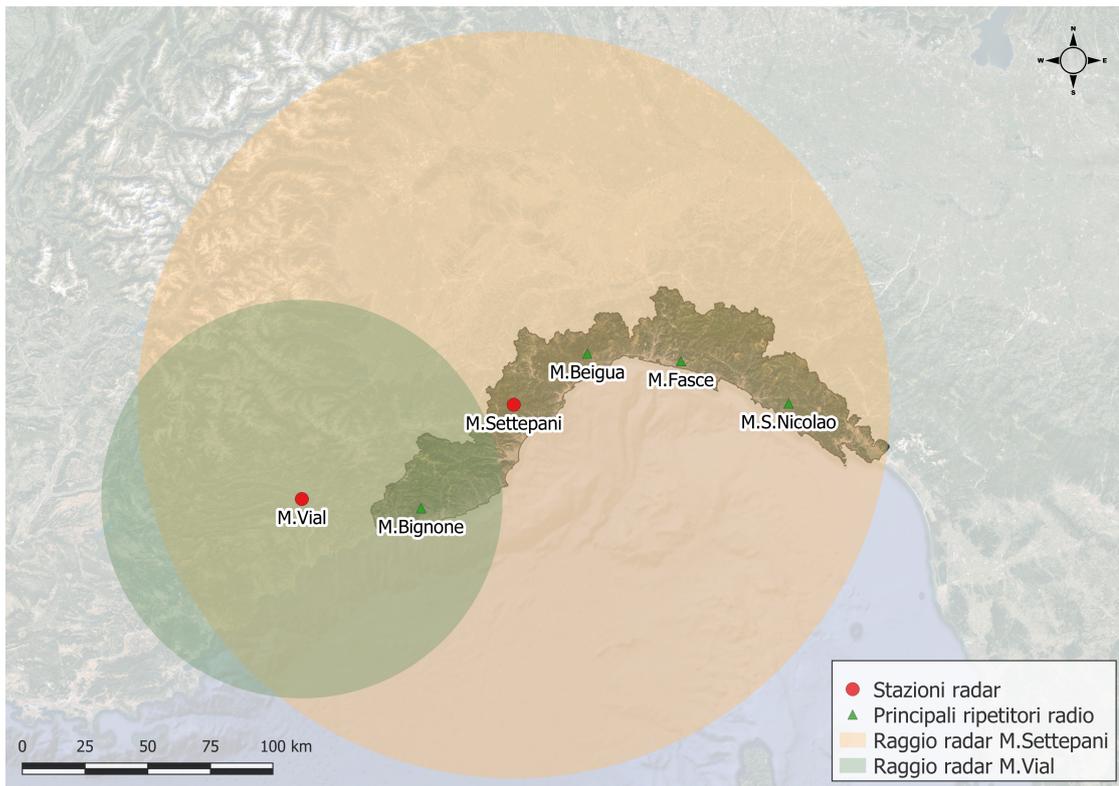


Figura 3.4: Localizzazione geografica degli apparati Radar di Monte Settepani e di Mont Vial, e dei principali ripetitori radio regionali.

eseguire una qualsiasi rielaborazione, il dato relativo al periodo di tempo considerato deve essere estratto dal DB tramite operazione di *Query*. Il dato grezzo si presenta quindi suddiviso in due componenti: una legata all'informazione geografica delle stazioni funzionanti per l'evento considerato e la seconda alla variabile misurata dalla stazione (precipitazione, temperatura, ecc.). Di seguito si riporta un breve schema concettuale (figura 3.5), che rappresenta più chiaramente quanto appena descritto.

Quindi si esegue una disamina più dettagliata sullo stato dei dati pluvio e termometrici utilizzati nel proseguo di questo lavoro, partendo dai primi.

Si precisa che una rete meteo-idrologica è un sistema dinamico, in quanto la disponibilità del dato da parte di una stazione dipende dal suo stato ("in servizio"/"fuori servizio"), è quindi raro possedere per ciascun evento lo schema completo di tutte le stazioni installate. Inoltre, anche per il caso di una singola stazione, la disponibilità di informazione sulla la totalità delle variabili che è in grado di misurare (precipitazione, temperatura, ecc.) non può essere assicurata, in quanto ciascuna variabile è stimata da una componente sensoristica apposita, il cui

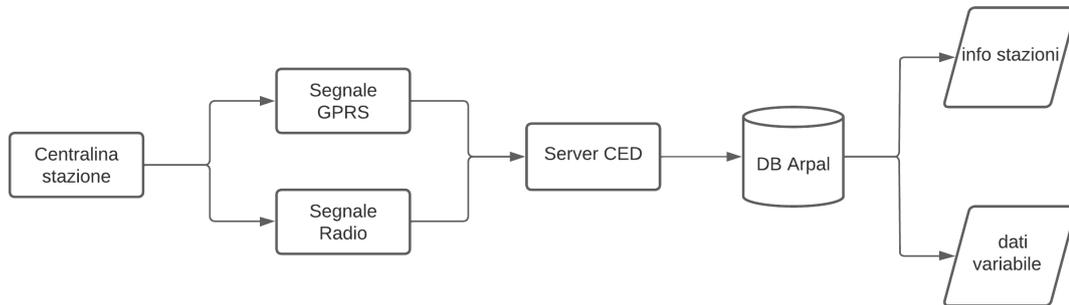


Figura 3.5: Lo schema di trasmissione dei dati meteorologici dalle stazioni al DB ARPAL.

stato di funzionamento definisce la disponibilità di informazione o meno.

Dati di precipitazione

I pluviometri presenti sulla rete, le cui specifiche tecniche sono state illustrate nel paragrafo 3.1.1, possiedono una risoluzione temporale di registrazione e trasmissione del dato di pioggia disomogenea, che può variare tra 5, 10 o 15 minuti a seconda della stazione.

Nella figura 3.6 è possibile osservare la distribuzione dei sensori pluviometrici per le tre classi di risoluzione temporale.

Invece, la risoluzione volumetrica di ciascuna misurazione è di $0.2mm$ di pioggia, in quanto rappresenta il volume di pioggia contenuto in uno dei due simmetrici comparti del sistema a bascula nel momento in cui avviene il ribaltamento del meccanismo il cui funzionamento è illustrato nel capitolo 1.2.

Dati di temperatura

La variabile termometrica è la seconda variabile fisica con risoluzione spaziale maggiore della rete OMIRL, preceduta solo da quella pluviometrica, come visto con il grafico 3.1.1.

Inoltre, come si osserva nella loro rappresentazione geografica 3.3, i sensori termometrici tendono a coincidere spazialmente con quelli pluviometrici, essendo installati sulla stessa stazione.

Anche la risoluzione temporale dei sensori di temperatura installati sulla rete OMIRL non è omogenea come nel caso delle misure pluviometriche, ma varia tra 5, 15 o 30 minuti a seconda della stazione. In figura 3.7 è possibile osservare

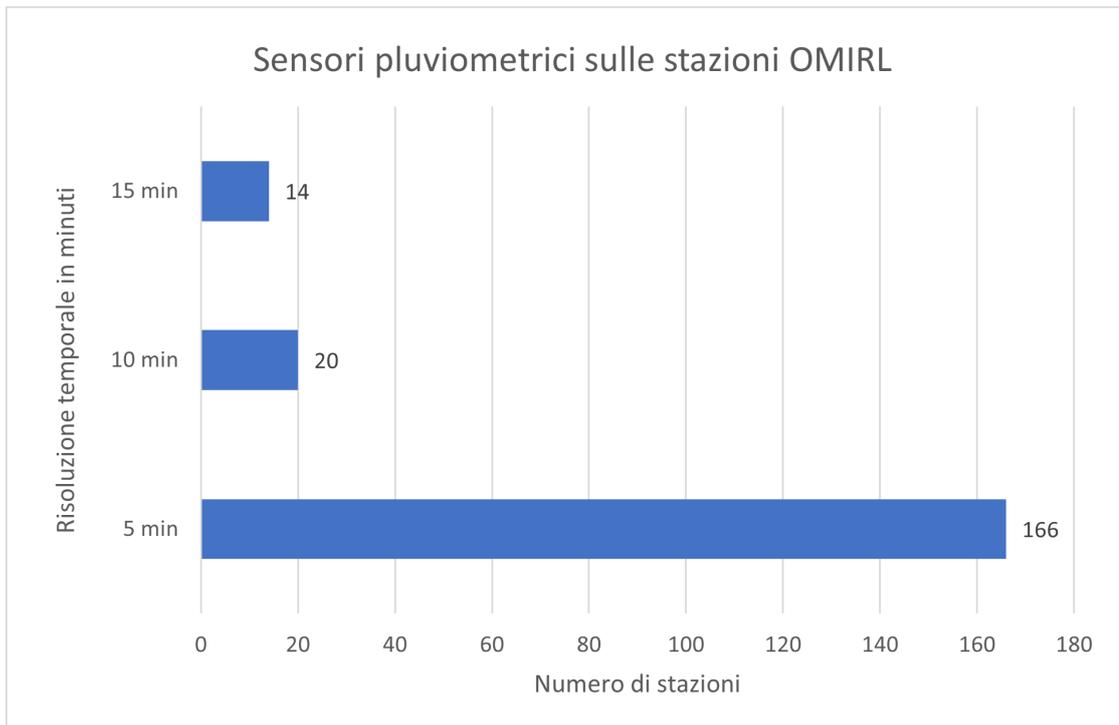


Figura 3.6: La risoluzione temporale di misura delle stazioni pluviometriche della rete OMIRL

la distribuzione di frequenza all'interno della rete OMIRL per le tre classi di accuratezza temporale. La risoluzione di misura è invece di $0.1^{\circ}C$.

3.3.2 Struttura del dato radar

L'informazione radar della rete OMIRL è composta dalla mosaicatura del dato raccolto dalle apparecchiature installate su Monte Settepani (SV) e su Mont Vial (Nizza - Francia), la quale viene raccolta, elaborata ed immagazzinata come immagine raster all'interno della piattaforma *RadarElab*.

I raster grezzi dell'informazione radar definiscono per ciascun pixel dell'immagine, di dimensione $1km \times 1km$, il valore di pioggia stimata dal dato mosaicato su cadenza temporale di 5 minuti.

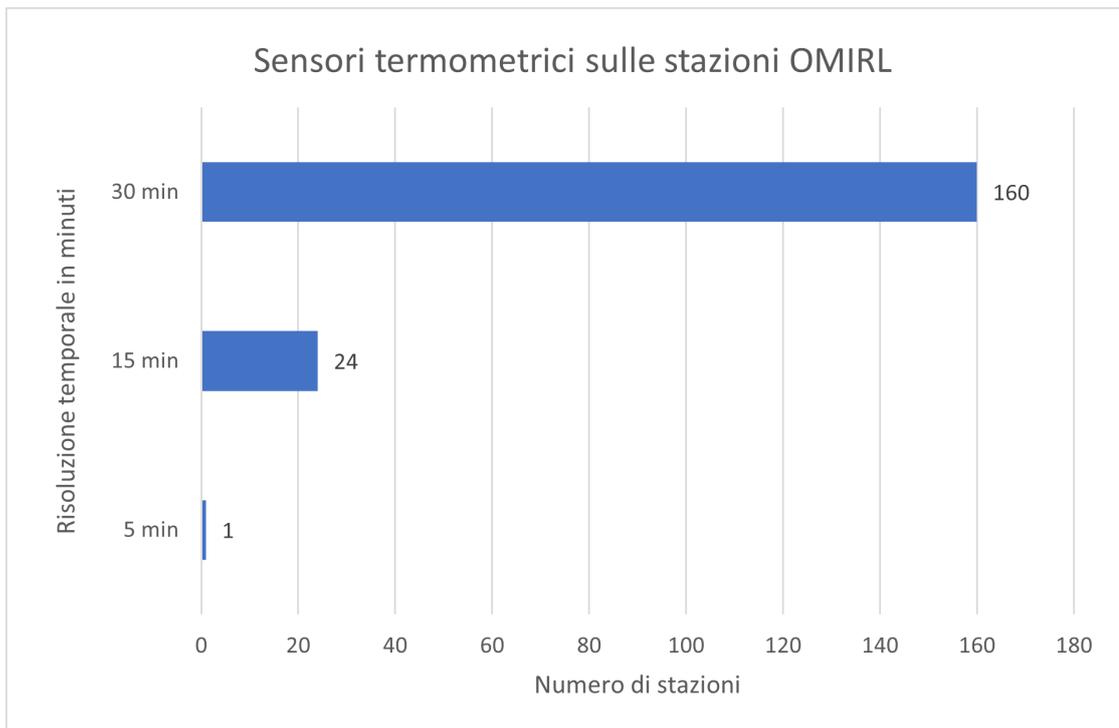


Figura 3.7: La risoluzione temporale di misura delle stazioni termometriche della rete OMIRL

Capitolo 4

Il metodo applicato

4.1 Valutazione del *RainGaugeQualityControl*

4.1.1 Struttura del metodo di riferimento

La procedura di controllo della qualità dei pluviometri è stata sviluppata presso l'Istituto Nazionale Polacco di Meteorologia e Gestione delle acque (IMGW) allo scopo di ottenere una definizione in tempo reale della qualità dei dati telemetrici della rete pluviometrica nazionale. L'algoritmo di controllo definito dall'IMGW, da questo momento chiamato *RainGaugeQC*, è una procedura che permette di fornire un'indicazione quantitativa sulla qualità delle osservazioni eseguite dalla rete pluviometrica nazionale, ottenuta secondo un indice di qualità (QI) [24]. L'indice di qualità è definito da un valore numerico compreso tra 1.0, nel caso di osservazione perfetta, e 0.0 nel caso di misura totalmente irrealistica.

Come sottolineato dagli stessi autori, questo approccio presenta il vantaggio, rispetto ad altri algoritmi di controllo dell'acquisizione dei dati pluviometrici, di eliminare solamente le osservazioni con indice di qualità nullo, mantenendo tutte le altre, alle quali è associato però l'indice di qualità ottenuto. Questo permette di conservare l'informazione originaria con un peso associato alla sua qualità, il quale può essere molto utile in rielaborazioni successive quali interpolazioni spaziali del dato pluviometrico misurato [24].

La procedura *RainGaugeQC* è costituita essenzialmente da una serie di controlli in cascata uno di seguito all'altro, basati su criteri logici, ai quali è sottoposto il dato grezzo raccolto e trasmesso dai pluviometri. A seconda che vengano soddisfatti tali criteri, e in quale percentuale, viene mantenuto o diminuito l'indice di qualità associato alla misura analizzata. Prima dei controlli, a ogni sensore viene assegnato il valore di QI unitario, ed in caso di fallimento di un particolare controllo il valore di QI viene diminuito di un valore predeterminato. Se il valore QI finale, dopo esser stato analizzato da ciascun controllo, è nullo o negativo ($QI \leq 0.0$), il sensore viene

considerato come inattendibile ed il valore di misura viene tramutato in “valore non disponibile” (NA).

Questo approccio semplice ma altrettanto efficace viene ripreso nei suoi principi anche dalla procedura sviluppata ed applicata in questa tesi, ovvero il *CorkDetective*.

Controllo degli errori grossolani (GEC) e Controllo sulla climatologia locale (RC)

In primo luogo, il *RainGaugeQC* esegue semplici test di plausibilità, ovvero il controllo dell’errore grossolano (*Gross Error Check* - GEC) ed il controllo sui limiti definiti dalla climatologia locale (*Range Check*-RC).

In seguito, vengono eseguiti controlli di formulazione più articolati, che vedono il loro cardine nella “funzione di somiglianza” (SF) definita per sensori installati su una stessa stazione pluviometrica. Infatti, la rete telemetrica polacca è costituita nella sua quasi totalità da stazioni composte da un doppio sensore pluviometrico (riscaldato e non riscaldato). Questa è una specifica fondamentale soprattutto nell’ottica della presentazione dell’algoritmo *CorkDetective*, dal momento che la rete OMIRL è formata nella quasi totalità esclusivamente da pluviometri composti da un singolo sensore non riscaldato. L’utilizzo della funzione di somiglianza permette di stabilire, al termine della procedura definita dal *RainGaugeQC*, quale sia il sensore più affidabile di ciascuna stazione telemetrica, da preferire per le applicazioni idrologiche successive. Nel caso in cui dovessero possedere lo stesso QI, il sensore riscaldato è quello indicato dalla procedura *RainGaugeQC*. Quindi, la funzione $SF(G_h, G_{uh})$ mette a confronto i dati di precipitazione di due sensori G_h e G_{uh} (riscaldati e non riscaldati) installati nella stessa stazione pluviometrica G e ne permette il confronto diretto.

Il primo controllo eseguito è quello relativo a possibili errori grossolani che hanno un forte effetto sulle analisi successive, il GEC. Questi errori sono causati principalmente dal malfunzionamento dei dispositivi di misura o da errori che si verificano durante l’elaborazione dei dati [51]. Il GEC controlla che la misura del pluviometro rientri nei limiti fisicamente accettabili: non inferiore a 0 mm e non superiore a 56 mm/10 min (cioè 51 dBZ). Il limite superiore è stato determinato sulla base di una formula sviluppata per stimare la precipitazione massima affidabile su varie durate in Polonia [52]. Il GEC è una prerogativa che ogni misura deve soddisfare per poter accedere ai controlli successivi, e quindi in caso di fallimento del controllo la misura viene scartata.

In seguito al GEC, le misure trasmesse dalle stazioni pluviometriche sono sottoposte all’*Range Check* (RC), ovvero ad un controllo definito rispetto ad un valore di soglia, che si basa sui dati climatologici locali in relazione alla variazione stagionale delle osservazioni nella specifica località della stazione pluviometrica. L’RC identifica i dati come non plausibili quando superano il valore massimo

previsto, ovvero la soglia stimata empiricamente dai dati climatologici di lungo periodo. Gli autori riportano quindi l'importanza di garantire valori affidabili della soglia, in quanto una soglia troppo bassa può far sì che valori estremi di precipitazione assolutamente plausibili non superino il test troppo severo [53]. Per questo motivo alcuni autori raccomandano di sviluppare soglie specifiche regionali per l'esecuzione dei controlli sui massimi climatologici [54]. Di conseguenza, come sarà specificato successivamente, nello sviluppo dell'algoritmo *CorkDetective* si è rinunciato ad implementare un controllo RC, ritenendo questa scelta più cautelativa per gli scopi prefissati.

Controllo di Conformità Radar (RCC)

Il controllo eseguito successivamente dal *RainGaugeQC* è il Controllo di Conformità Radar (RCC), eseguito per identificare in prima battuta falsi zero di misurazione ed in secondo luogo false misure di precipitazione segnalate dai pluviometri, sulla base dei dati radar che indicano in modo abbastanza affidabile la distribuzione spaziale delle precipitazioni [24].

L'RCC confronta quindi ogni osservazione inferiore a 0,2 mm/10 min con le osservazioni radar all'interno di una maglia quadrata di 3×3 *pixel*, dove la dimensione del *pixel* del raster del dato radar è di 1km. Nella maglia così definita viene estratto il valore massimo di stima radar, e se questo è superiore ad una soglia predefinita, allora il risultato di assenza di pioggia misurato dal sensore viene considerato falso e il QI di quest'ultimo viene ridotto a 0.0.

In seconda battuta, l'RCC confronta ogni osservazione del sensore $G > 0$ mm/10 min con le osservazioni radar nella maglia quadrata di 3×3 *pixel* come definita precedentemente. Se i dati radar hanno una qualità $QI(R)$ superiore a una soglia predefinita e non indicano alcuna precipitazione (0 mm), si presume che la precipitazione misurata dal sensore sia falsa e il QI dell'osservazione viene quindi ridotto. La riduzione del QI dipende dal fatto che siano disponibili o meno i dati di uno o due sensori, dalla loro somiglianza (definita tramite la SF) e dalla posizione del misuratore. La qualità dell'informazione radar definita in forma quantitativa è quindi una prerogativa per questa seconda parte del RCC, come anche la presenza di due sensori sul pluviometro indagato. Una possibilità di calcolo della qualità del dato radar è quella definita dall'algoritmo *RADVOL-QC*, sviluppato in [55].

Controllo di Coerenza Temporale (TCC)

Il Controllo di Coerenza Temporale (TCC) viene eseguito in due fasi: la prima verifica l'intasamento di un sensore, che può verificarsi quando uno stesso valore misurato dal pluviometro si ripete per un certo periodo di tempo prefissato. Nella fase successiva, le coppie di sensori pluviometrici riscaldati e non riscaldati di ciascuna stazione (G_h, G_{uh}) vengono testate per verificare l'esistenza di marcate

differenze tra di loro. Questa verifica richiede le misurazioni di entrambi i sensori pluviometrici per ciascuna stazione indagata e può essere condotta solo nei mesi caldi dell'anno, dal momento che solo in quel periodo si potranno acquisire le serie temporali di una stessa stazione. In questa seconda fase del TCC, l'affidabilità dei sensori è valutata attraverso la SF. Se non vi è congruenza tra i valori misurati dai due sensori, l'indice di qualità di entrambi è diminuito. Anche questo controllo, nella sua applicazione completa, è possibile solo quando in ogni stazione di misura sono installati due sensori, preferibilmente uno riscaldato e uno non riscaldato, come previsto nella rete IMGW [24].

Gli autori raccomandano cautela nella definizione stessa del TCC, in quanto per alcuni tipi di dati meteorologici i controlli di continuità temporale sono efficienti, ma nel caso delle precipitazioni questo controllo potrebbe eliminare non solo tutti i dati poco attendibili, ma anche una grande quantità di dati veritieri, a causa dell'elevata variabilità delle precipitazioni stesse, in particolare per i valori estremi di pioggia [56].

Controllo di Coerenza Spaziale (SCC)

In ultima istanza si presenta il Controllo di Coerenza Spaziale (SCC), il quale viene applicato allo scopo di identificare in una prima fase valori pluviometrici anomali in base a un confronto spaziale con le stazioni vicine, e di classificarli in base al grado di scostamento della misura rispetto alle misure eseguite in sua prossimità dalle altre stazioni. In una seconda fase vengono introdotti i dati radar per valutare il livello di riduzione del QI per i valori anomali.

In primo luogo, l'area del dominio (l'intero territorio polacco) viene suddivisa in sottodomini di base con una risoluzione spaziale di $100km \times 100km$. Successivamente, per ciascun sottodominio vengono calcolati una serie di percentili dei dati pluviometrici e la deviazione assoluta mediana del sottodominio (MAD). Il criterio per la coerenza spaziale di un singolo sensore è quindi basato sull'indice D, definito secondo la formula di Kondragunta e Shrestha (2006) [57].

Questo indice viene confrontato con i valori di soglia definiti da una serie di percentili dell'indice D, permettendo così di determinare le diverse classi di outlier. Il controllo viene ripetuto per sottodomini ottenuti dalla traslazione di $25km$ del dominio principale nelle quattro direzioni. Se il valore del sensore viene identificato come un outlier viene applicata un'ulteriore articolata procedura per valutare la relativa riduzione dell'indice QI, basata sui risultati del TCC, sulla SF dei due sensori installati sulla stazione indagata e sul dato radar (con associato l'indice di qualità radar QI(R)). La riduzione del valore QI dipende quindi dalla classe di outlier spaziale a cui appartiene la misura e dall'entità di scostamento con i dati radar.

QI spazialmente distribuito

Infine il *RainGaugeQC* definisce anche la definizione di un indice di qualità distribuito spazialmente, come il prodotto dell'indice di qualità, ottenuto precedentemente ed interpolato sul dominio, e del grado di incertezza del campo stimato. Formalizzando quando detto si ottiene:

$$QI(G_{int}(x, y)) = QI(G_{int}(x, y))_p \times QI(G_{int}(x, y))_d \quad (4.1)$$

Dove $QI(G_{int}(x, y))_p$ è il campo definito dall'interpolazione spaziale del QI di ciascuna stazione della rete, ottenuto tramite procedura di Kriging ordinario. Il secondo termine $QI(G_{int}(x, y))_d$ rappresenta invece il termine di incertezza spaziale di ciascun punto (x, y) del campo interpolato, legato alla distanza con la stazione pluviometrica più vicina, definito come:

$$QI(G_{int}(x, y))_d = \frac{d_{max} - d(x, y)}{d_{max}} \quad (4.2)$$

Dove $d(x, y)$ rappresenta la distanza dalla stazione più vicina, mentre d_{max} rappresenta un limite imposto oltre al quale l'indice di qualità del punto considerato è ridotto a zero.

4.1.2 Studio della fattibilità applicativa al caso studio

Di seguito si tratta la applicabilità della procedura *RainGaugeQC* al caso studio di questa tesi, ovvero al territorio della regione Liguria, e soprattutto si evidenziano le differenze che hanno portato alla formulazione di una procedura più funzionale alle caratteristiche idro-morfologiche liguri e della sua rete di misura, ovvero il metodo *CorkDetective*.

Innanzitutto, è di fondamentale importanza osservare la differenza tra i due tipi di regime climatologico, che in Polonia risulta molto freddo e continentale anche se non estremamente piovoso, mentre quello mediterraneo è caratterizzato da eventi di pioggia molto eterogenei ed estremi. Questo comporta per il caso ligure delle incertezze climatologiche maggiori rispetto al caso polacco, che hanno portato ad escludere i controlli sui massimali di pioggia definiti da limiti climatologici come il Range Check, oltre alla scelta di compiere una analisi cautelativa, e di non imporre quindi un valore massimo di pioggia atteso.

Inoltre, è da notare che il territorio ligure ha un'estensione areale di 5'418 km², appena l'1,7% dei 322'575 km² che costituiscono la superficie polacca. Questa differenza geografica non può che ripercuotersi, oltre che su differenze geomorfologiche ed idrologiche delle due regioni, anche nella selezione dei domini e sub-domini di indagine dei controlli imposti dall'algoritmo. Nello specifico per il territorio ligure è più ragionevole ipotizzare ricerche di comportamenti estremamente localizzati, alla

scala di una decina di chilometri, incompatibili con l'analisi a scala delle centinaia di chilometri del SCC del *RainGaugeQC*. Come già accennato, anche la geomorfologia dei due territori si discosta enormemente, dal momento che la Polonia è composta per il 90% da aree di pianura, contro il 65% di aree montuose in Liguria. Questo comporta differenze fondamentali soprattutto a livello idromorfologico, con la presenza di bacini grandi e di pianura in Polonia mentre la Liguria possiede in gran parte bacini ridottissimi e ripidi, come visto nella sezione 2.1.2.

Per quanto riguarda la strumentazione installata, nella rete OMIRL vi è una differenza fondamentale di acquisizione del dato rispetto a quella IMWG. Infatti, nella rete ligure la misura pluviometrica è eseguita da classici pluviometri a bascula non riscaldati, mentre l'IMWG ha installato prevalentemente pluviometri a doppio sensore, ovvero sia riscaldati che non riscaldati su una stessa stazione. Questo fatto può essere giustificato dalla natura principalmente nevosa delle precipitazioni in Polonia, contro le scarse nevicate liguri nelle sole zone interne (eccezion fatta per alcuni giorni all'anno, come il periodo in cui questa tesi sta venendo revisionata, febbraio 2023). A livello di implementazione dell'algoritmo sviluppato dall'IMWG, questo fatto comporta il parziale riadattamento dei tre controlli cardine del *RainGaugeQC*, ovvero l'RCC, il TCC e l'SCC, in modo tale da sopperire alla mancanza di informazione dovuta al singolo sensore della rete OMIRL.

Da notare che la rete ligure è più improntata a monitorare e rappresentare fenomeni locali grazie alla sua elevata densità di stazioni, pari ad una stazione ogni $32km^2$, contro le sole 503 stazioni della rete polacca, destinate a coprire una superficie di due ordini di grandezza maggiore rispetto alla Liguria, con una densità media di appena una stazione ogni $641km^2$.

Infine, per quanto riguarda i controlli relativi al riconoscimento di errori grossolani (GEC) e sui limiti strumentali di acquisizione, previsti in *RainGaugeQC*, questi non vengono definiti nella procedura riportata di seguito, perché già implementati all'interno della rete di trasmissione del dato dalle stazioni telemetriche al database ARPAL (come riportato in figura 3.5).

Si riporta di seguito la tabella 4.1.2, che riassume di quanto appena esposto, ovvero la struttura del metodo *RainGaugeQC* e la sua applicabilità al territorio ligure.

Tabella 4.1: I controlli di *RainGaugeQC* e la loro applicazione alla rete ligure tramite *CorkDetective*

Sigla <i>Rain-GaugeQC</i>	Nome	Approccio principale	Risultato controllo	Previsto doppio sensore	Applicazione in <i>CorkDetective</i>
GEC	<i>Gross error check</i>	Rilevamento del superamento del limite naturale.	Rimozione dei valori che superano i limiti fisici naturali.	No.	No, già eseguito da centro Reti anteriormente ingresso nel DB ARPAL.
RC	<i>Range check</i>	Rilevamento del superamento della soglia basata sulla climatologia locale.	Riduzione del QI per sospetti valori eccessivi.	No.	No, si ritiene opportuno non selezionare una soglia superiore sulla sola analisi climatologica per ragioni di cautela.
RCC	<i>Radar conformity check</i>	Verifica della conformità delle osservazioni pluviometriche e radar.	Rimozione dei "falsi zero" di precipitazione.	Sì.	Sì, compatibilemente con caratteristiche rete OMIRL (assenza del doppio sensore).

–*Continua nella pagina successiva*

Tabella 4.1 – Continua dalla pagina precedente

Sigla Rain-GaugeQC	Nome	Approccio principale	Risultato controllo	Previsto doppio sensore	Applicazione in
TCC	<i>Temporal consistency check</i>	Verifica della coerenza delle serie temporali provenienti da sensori riscaldati e non riscaldati.	Riduzione del QI per sensori inconsistenti.	Sì.	CorkDetective Sì, compatibilemente con caratteristiche rete OMIRL (assenza del doppio sensore).
SCC	<i>Spatial consistency check</i>	Controllo della coerenza spaziale dei pluviometri adiacenti.	Riduzione del QI degli outliers in coerenza con il loro livello di inconsistenza spaziale.	Sì.	Sì, compatibilemente con caratteristiche rete OMIRL (assenza del doppio sensore).

4.2 Presentazione del metodo *CorkDetective*

Il metodo di seguito presentato prende vita dal confronto diretto con i previsori ed idrologi dell'Unità Operativa Clima Meteo Idro dell'Agenzia regionale di protezione dell'ambiente ligure (ARPAL), volto a risolvere nello specifico una criticità da questi sollevata, ovvero casi di occlusione delle stazioni pluviometriche OMIRL con conseguente falsificazione dei dati di monitoraggio idrologico. Il seguente metodo è stato quindi pianificato tramite analisi dello stato dell'arte presente in letteratura, riportata nella sezione 1.7 ed in particolare nella sezione 4.1, e successivamente messo in pratica tramite la scrittura ex novo di un articolato algoritmo.

4.2.1 Elementi cardine del metodo proposto

Nel presente capitolo si illustra lo scopo della procedura definita dall'algoritmo *CorkDetective* o *CorkDet* e di seguito se ne presentano gli elementi cardine per raggiungere l'obbiettivo prefissato.

L'algoritmo *CorkDet* è una procedura di elaborazione del dato trasmesso dalla rete pluviometrica ligure allo scopo di controllare in tempo reale il suo corretto funzionamento, con una attenzione particolare all'individuazione delle stazioni pluviometriche che soffrono di occlusione della bocca filtrante.

Il fenomeno di occlusione dei pluviometri è un evento difficile da riconoscere, in quanto avviene senza presentare anomalie di trasmissione dell'informazione da parte dello strumento (che lo renderebbero individuabile), ma piuttosto con l'invio di una informazione falsata ("falsi zero" di misura) [24]. Infatti, in caso di evento di pioggia nell'area in cui è stato posizionato, un pluviometro ostruito è "cieco" dell'evento in atto e misura dei falsi zero di precipitazione per l'intera durata della pioggia, come si vedrà nel caso applicativo al paragrafo 5.

Questo fatto è estremamente fuorviante per le successive analisi idrologiche che interessano l'informazione raccolta dai pluviometri, da sempre considerata come affidabile [24]. Poter quindi individuare questa criticità di raccolta del dato evita che questo errore possa propagarsi nelle analisi che sfruttano il dato stesso, secondo i principi WMO [4].

Inoltre, può verificarsi che una stazione pluviometrica sia soggetta a fenomeni di sottostima del dato sulla pioggia in corso per motivazioni fisiche molto varie, che possono andare dalla parziale occlusione della bocca di raccolta ai forti venti che possono interessare l'area [24] in cui è posizionata la stazione. La sottostima dei pluviometri è quindi un fenomeno le cui cause sono molto complesse ed estremamente varie. Sarebbe infatti indispensabile un'analisi sito specifica per poterle individuare con precisione.

Nella procedura CorkDet si è proceduto quindi ad implementare un algoritmo con una prima fase di preelaborazione dei dati pluviometrici, per identificare le criticità di trasmissione degli stessi da parte delle stazioni pluviometriche, ed in seguito con una seconda fase di valutazione della qualità delle misure di pioggia effettuate, tramite controlli logici fisicamente basati, al fine di identificare le stazioni che nel corso dell'evento monitorato presentano dati di scarsa attendibilità.

Al termine della fase di preelaborazione viene assegnato a ciascuna stazione un QI unitario, che viene diminuito a seconda del superamento o meno dei controlli successivi, il cui valore finale corrisponde alla definizione quantitativa della qualità della sua misurazione.

I controlli volti ad identificare criticità di misurazione e definizione di un indice di qualità quantitativo (QI) sono strutturati su criteri logici "in cascata" uno di seguito all'altro, fisicamente basati sulla natura del fenomeno. Durante l'esecuzione di ciascun controllo vengono verificate alcune ipotesi per ciascuna stazione analizzata, che se non soddisfatte, comportano il fallimento del controllo. Quest'ultimo impone quindi una diminuzione preimpostata del QI della stazione che non ha superato il controllo logico.

Si specifica, come sarà riportato successivamente, che l'utilizzatore del *CorkDet* ha la possibilità di impostare ciascun fattore correttivo del QI delle stazioni in caso di fallimento dei controlli. È fondamentale tenere a mente che la combinazione lineare dei fattori correttivi debba essere pari a 0.0 nel caso di fallimento di tutti i controlli previsti da ciascuna stazione. Di seguito si riporta la tabella riassuntiva 4.2.1 dei controlli implementati in *CorkDet*, con i rispettivi parametri e penalizzazioni imposte al QI in caso di fallimento del controllo.

Tabella 4.2: I controlli implementati in *CorkDetective*

Sigla <i>CorkDetective</i>	Struttura del controllo	Breve descrizione	Parametri di input preimpostati	Penalizzazione preimpostata in CorkDet
RCC	Verifica della conformità delle osservazioni pluviometriche e radar.	Estrazione della stima radar massima attraverso un buffer attorno alla stazione e confronto con il corrispettivo valore di misura pluviometrica.	Raggio del buffer per estrazione dato radar pari a 1'500 m, "Zero" di osservazione pluviometrica pari a 0.2 mm, "Zero" di osservazione radar pari a 0.2 mm.	- 0.5
TCC	Verifica della coerenza temporale delle misure pluviometriche.	Confronto della misura pluviometrica con i valori delle finestre temporali passate e con risultato RCC.	Numero di finestre temporali su cui eseguire il confronto pari a 3 (Comprende anche quella analizzata).	- 0.25

–*Continua nella pagina successiva*

Tabella 4.2 – Continua dalla pagina precedente

Sigla	Struttura del controllo	Breve descrizione	Parametri di input preimpostati	Penalizzazione preimpostata in CorkDet
SCC	Controllo della coerenza spaziale con le misure dei pluviometri adiacenti.	Confronto della misura pluviometrica con il decimo percentile delle osservazioni delle stazioni circostanti.	Raggio di ricerca delle stazioni in prossimità pari a 10'000 m.	- 0.25

Infine si presenta al sottocapitolo 4.2.3 il *plugin* dell'algoritmo *CorkDet*, lo *SnowyDet* o *SnowyDetective*, volto ad individuare e segnalare agli utilizzatori della procedura la possibile presenza di eventi di precipitazione nevosa in corso o di eventi di fusione di neve accumulata nelle stazioni pluviometriche.

Controllo della trasmissione corretta ed aggregazione temporale dei dati

Un aspetto fondamentale per procedere al corpo principale del metodo, ovvero ai controlli di qualità del dato, è quello di controllare che la trasmissione dei dati dalle stazioni idro-meteorologiche sia avvenuta in modo corretto ed in seguito di aggregare tali dati su una finestra temporale uniforme.

La trasmissione dei dati dalle stazioni al DB può infatti avvenire in modo errato per motivi quale la mancanza di una corretta alimentazione elettrica della stazione o per anomalie di trasmissione della rete *wireless* o radio. Normalmente una anomalia di trasmissione si manifesta attraverso un valore pari a “non disponibile” (NA) per l'informazione trasmessa, una volta estratta dal DB che la contiene.

Nella procedura dell'algoritmo *CorkDet* si esegue questo controllo andando a verificare che la risoluzione temporale del sensore installato sulla stazione in esame sia coerente con il numero di acquisizioni diverse da NA nella finestra temporale considerata.

Questa procedura è giustificata dal fatto che l'informazione all'interno del DB viene memorizzata alla scala temporale di acquisizione delle stazioni a maggior risoluzione, restituendo correttamente un valore pari a NA per le stazioni con risoluzione minore. L'anomalia di trasmissione si manifesta quando viene individuato un valore NA per istanti temporali che coincidono con quelli della risoluzione del sensore.

In questo caso, su indicazione dell'utente (sebbene fortemente raccomandato) l'algoritmo classifica la stazione come non attendibile e la esclude dalle ulteriori elaborazioni successive, restituendo l'elenco delle stazioni che presentano anomalie di trasmissione al DB.

Quindi l'algoritmo *CorkDet* prevede l'aggregazione, su una finestra temporale definita dall'utente (predefinita su 30 minuti), dei dati utilizzati nelle fasi successive dell'analisi, la quale coincide con la risoluzione temporale dell'algoritmo stesso. Questo passaggio è imprescindibile, in quanto le stazioni meteorologiche e pluviometriche sono dotate di sensori con risoluzione temporale non uniforme, che può variare dai 5 minuti per quelle più accurate, a 30 minuti per alcune stazioni termometriche. Inoltre, sulla stessa finestra temporale è eseguita l'aggregazione della stima di pioggia radar, che di base ha una risoluzione temporale di 10 minuti.

Infine, la fase di preelaborazione dei dati di input si conclude con l'estrazione dell'informazione radar per ciascuna stazione analizzata, dal momento che i controlli

di qualità si basano in larga parte sul confronto dell'informazione pluviometrica con quella raccolta dalle stazioni radar.

Questa fase avviene attraverso un'operazione di buffer spaziale con centro posizionato sulla stazione pluviometrica. Il valore preimpostato è pari a $1,5\text{km}$, come suggerito nella procedura *RainGaugeQC* [24], alla quale lo sviluppo di *CorkDet* è direttamente ispirato. La procedura di estrazione preleva dal dato radar il valore massimo contenuto nel buffer appena definito, e lo attribuisce al valore di riferimento radar per la stazione considerata.

Si conclude così la fase di preelaborazione dei dati pluviometrici per passare alla fase di esecuzione dei controlli logici di seguito illustrati.

Struttura del *RCC*

Il Controllo di Conformità Radar (*RCC*) è parzialmente ispirato, come anche i successivi due controlli, dall'omonimo controllo definito nell'algoritmo *RainGaugeQC* [24], sebbene se ne debba discostare per le motivazioni elencate nel capitolo 4.1.2. Lo scopo del controllo *RCC* è quello di individuare le stazioni pluviometriche che stanno registrando dei "falsi zero" di misurazione, considerando il dato radar un buon indice qualitativo sulla presenza o l'assenza di un evento precipitativo in corso [24].

Nel corso di questo controllo viene quindi confrontato il valore pluviometrico misurato dalla stazione con l'intensità di pioggia radar in prossimità della stazione stessa. Le soglie del confronto sono selezionabili da parte dell'utente, ma inizialmente preimpostate sul controllo dello zero di osservazione pluviometrica pari a $0.2\text{mm}/30\text{min}$. Nel caso in cui una stazione non superi il controllo *RCC* il suo *QI* viene diminuito di un fattore definito nella finestra di interazione con l'utente, preimpostato inizialmente pari a 0.5.

Nel paragrafo 4.2.2 si illustrerà in modo più dettagliato lo schema logico seguito dal controllo.

Struttura del *TCC*

Successivamente all'*RCC*, la procedura *CorkDet* prevede di effettuare il Controllo di Coerenza Temporale (*TCC*), sfruttando la motivazione che se una stazione misura un valore ripetuto per più finestre temporali successive, questo potrebbe essere "sintomo" di una probabile occlusione del pluviometro [24]. Questo fatto è ancor più evidente nel momento in cui questo valore ripetuto, solitamente nullo, si rilevi in corrispondenza di una rilevazione pioggia da parte della strumentazione radar.

Le finestre temporali su cui eseguire il *TCC* sono preimpostate ad un valore di due istanti temporali anteriori all'istante considerato (1 h), ma anche questo è un parametro di libera scelta da parte dell'utente. In caso di fallimento del *TCC*, il

QI della stazione viene ridotto di un valore preimpostato di 0.25, modificabile nella finestra iniziale di dialogo.

Nel paragrafo 4.2.2 si illustrerà nello specifico lo schema logico seguito dal controllo.

Struttura dell'SCC

La definizione del valore finale del QI di ciascuna stazione compete al Controllo di Coerenza Spaziale (SCC).

L'SCC è strutturato in modo tale da ricercare inizialmente le stazioni della rete prossime alla stazione analizzata, e di definire la loro distribuzione percentuale di pioggia misurata al suolo. Il raggio di ricerca è preimpostato a 10km, parametro che sceglie l'utilizzatore di *CorkDet*. Nel caso in cui la stazione analizzata ricada al di sotto del decimo percentile della distribuzione locale di pioggia, l'SCC registra un fallimento e diminuisce il QI della stazione di un valore preimpostato pari a 0.25.

Nel paragrafo seguente, si illustra in modo più dettagliato lo schema logico seguito dal controllo.

4.2.2 Formalizzazione dell'algoritmo *CorkDetective*

In questo capitolo si descrive ciascuna fase dell'algoritmo *CorkDet*, attraverso una descrizione di ciascun passaggio concettuale e logico seguito dalla procedura. Si lascia al lettore più avido la possibilità di poter usufruire del codice grezzo, rendendolo disponibile se richiesto.

La procedura è stata infatti realizzata tramite linguaggio di programmazione *R*, scelto per la sua larga diffusione nella disciplina di trattamento statistico dei dati e per la sua filosofia di sviluppo *open source*, totalmente condivisa dagli sviluppatori.

Struttura generale della procedura

Attraverso la spiegazione di ciascun passaggio del seguente schema concettuale (figura 4.1), di seguito si descrive la struttura generale della procedura che vede il suo fulcro nell'applicazione dell'algoritmo *CorkDet*.

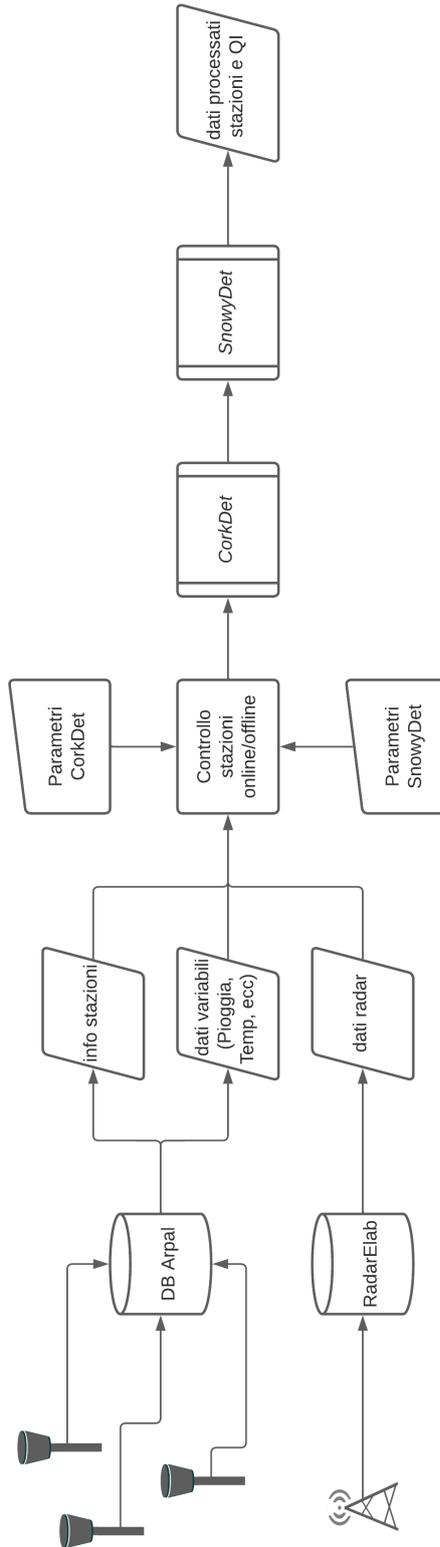


Figura 4.1: Lo schema concettuale dell'intera procedura

Questa procedura è strutturata per poter agire sia in modalità *online*, e quindi in tempo reale, che su eventi passati, in modalità *offline*. Non è prevista una differenza concettuale di sviluppo del metodo nei due diversi casi, sebbene nella pratica è necessario considerare la differente modalità di svolgimento *online* o *offline*.

In fase di avvio della procedura l'utente si interfaccia con una funzione con la quale ha la possibilità di interagire direttamente (“*Controllo stazioni online/offline*”), che prevede come primo passaggio l'estrazione dal DB:

- delle informazioni base di ciascuna stazione analizzata (Codice identificativo, nome, coordinate geografiche e risoluzione temporale della strumentazione installata).
- delle misure relative a ciascuna variabile analizzata dalle stazioni.
- delle mappe di pioggia prodotte dalla strumentazione radar.

In secondo luogo, l'utilizzatore procede con la verifica, ed eventualmente con la modifica dove lo ritiene opportuno, di alcuni parametri di input della procedura, sia per la funzione *CorkDet* che per il suo *plugin SnowyDet*. Al termine dell'inserimento dei parametri richiesti si procede con l'esecuzione della funzione *CorkDet* e successivamente *SnowyDet*.

Struttura della funzione *CorkDet*

Di seguito si illustra la definizione dei passaggi concettuali della funzione *CorkDet*, attraverso il seguente schema concettuale (figura 4.2).

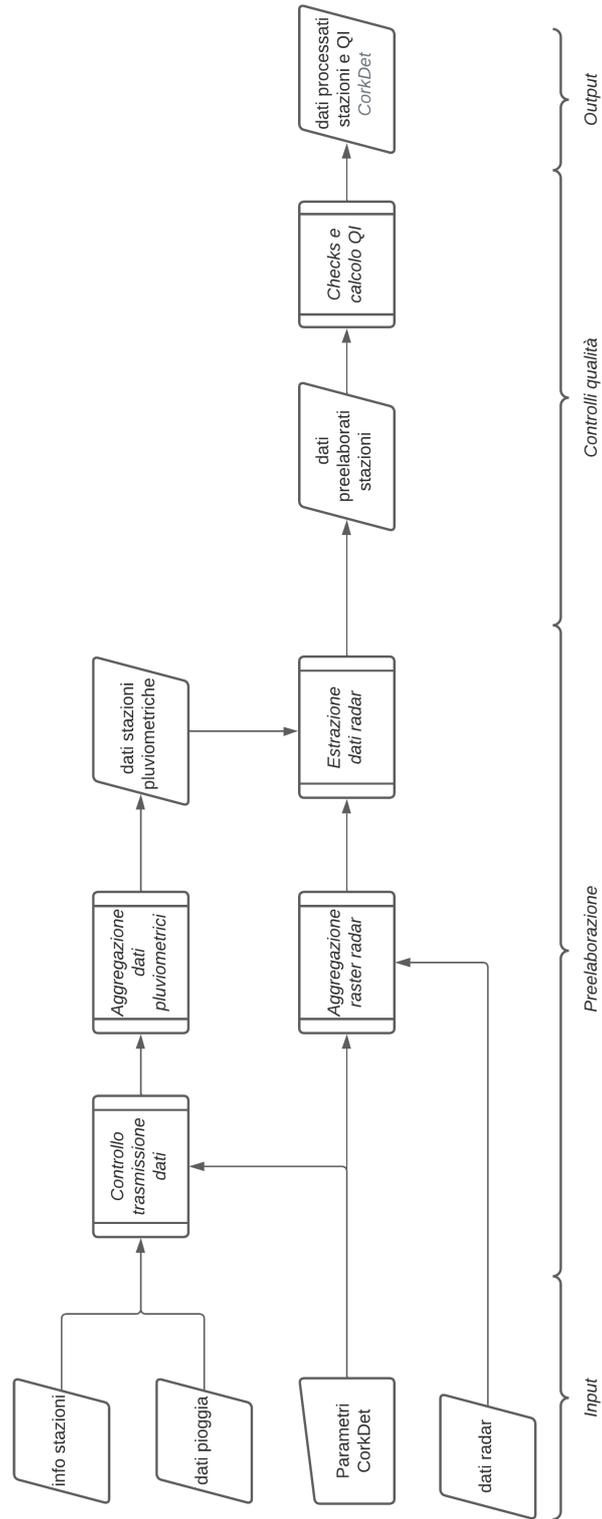


Figura 4.2: Lo schema concettuale della funzione CorkDetective

L'algoritmo *CorkDet* riceve in input i dati precedentemente estratti dal DB e dei parametri preimpostati o modificati nella pagina iniziale dall'utilizzatore.

La procedura prevede come primo passaggio una fase di preelaborazione dei dati in ingresso, controllando attraverso una funzione appositamente ideata (“*Controllo trasmissione dati*”) che la trasmissione dei dati da parte dei pluviometri sia stata eseguita correttamente, come specificato nel capitolo 4.2.1 ed eventualmente escludendo quelli con criticità. Successivamente a questo primo controllo si procede con l'aggregazione sulla finestra temporale scelta sia dei dati pluviometrici che del dato radar, con le funzioni “*Aggregazione dei dati pluviometrici*” e “*Aggregazione raster radar*”. Si conclude la fase di preelaborazione dei dati da sottoporre ai successivi controlli di qualità con l'estrazione del dato radar riferito a ciascuna stazione, per mezzo della funzione “*Estrazione dati radar*”.

I dati così preelaborati riferiti alle stazioni in buono stato di trasmissione sono inseriti in input alla funzione *CorkDet*, che con una sequenza di controlli logici fisicamente basati procede a restituire il risultato atteso, formato dai risultati di ciascuna delle tre verifiche previste (RCC, TCC, SCC) e dal valore finale di QI di ciascuna stazione.

Struttura dei controlli all'interno di *CorkDet*

In questo sottocapitolo si affronta lo schema logico dei controlli eseguiti dall'algoritmo *CorkDet*, riportato graficamente in figura 4.3.

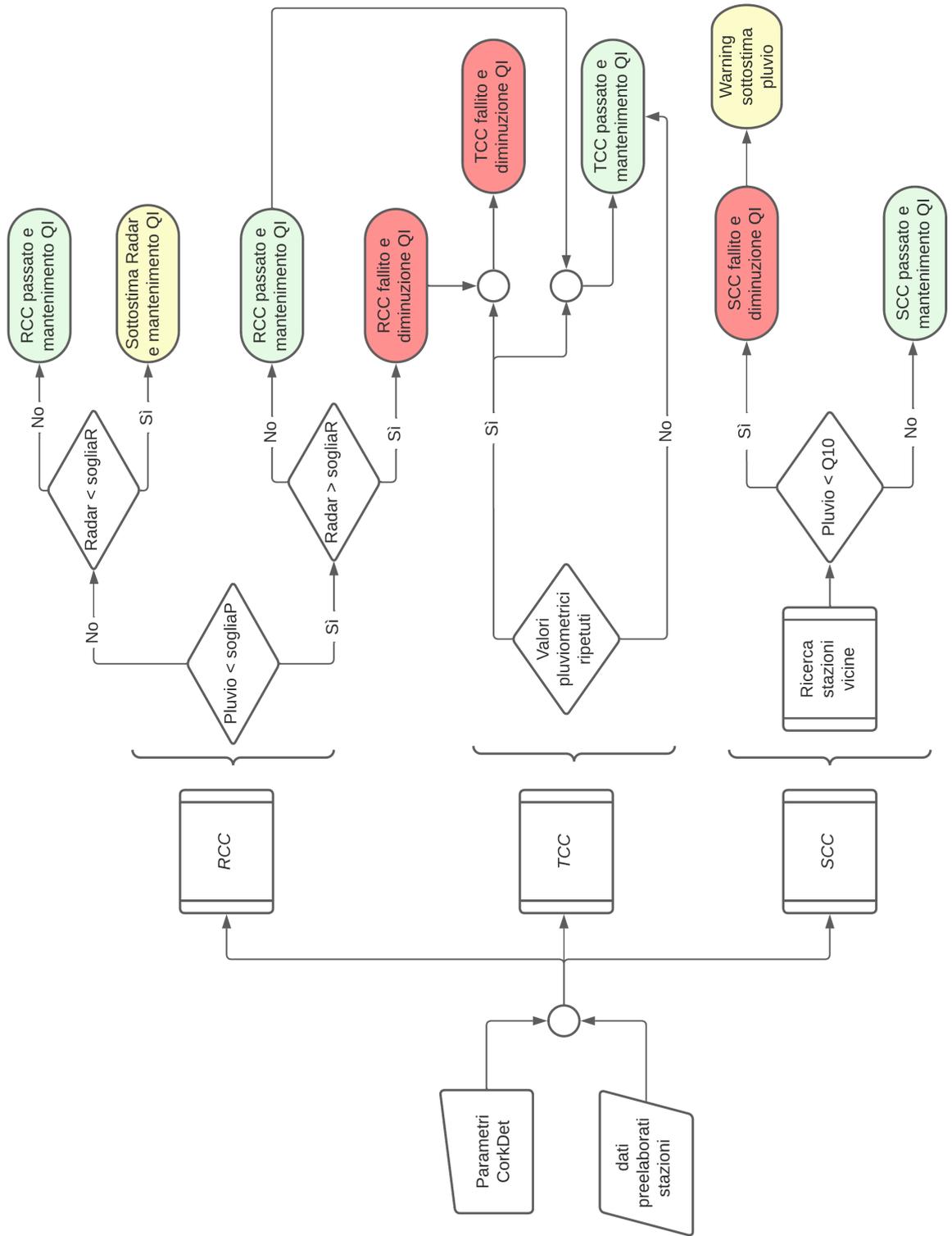


Figura 4.3: I controlli logici fisicamente basati all'interno della funzione CorkDetective

L'algoritmo *CorkDet* riceve in input i dati preelaborati, come descritto precedentemente, e i parametri inseriti dall'utente nella finestra di dialogo iniziale "*Controllo stazioni online/offline*". In particolare, tra questi parametri vi sono anche i valori di riduzione del QI in caso di fallimento da parte delle stazioni utilizzate per i controlli previsti.

In seguito, i valori di input sono inseriti nelle funzioni di controllo, eseguite da *CorkDet* nel seguente ordine:

- L'*RCC*.
- Il *TCC*.
- L'*SCC*.

La prima funzione di controllo ad essere eseguita da *CorkDet* è il Controllo di Conformità Radar (*RCC*), il cui output rappresenta anche una parte dei dati in ingresso alla funzione successiva, il *TCC*. Nell'*RCC* si confrontano i valori pluviometrici di ciascuna stazione con i corrispettivi valori radar. In particolare, si confronta il valore pluviometrico misurato dalla stazione con una soglia di pioggia prefissata in input (*sogliaP*): se questo è inferiore alla *sogliaP*, viene confrontata la stima radar per la stazione in esame con la soglia radar prefissata (*sogliaR*). Se quest'ultima è inferiore alla stima radar, la stazione in esame fallisce il controllo *RCC* e il suo QI è diminuito di un valore predefinito in input. D'altra parte, se il valore radar è inferiore alla *sogliaR*, l'algoritmo interpreta il valore pluviometrico inferiore alla *sogliaP* come corretto ed il controllo *RCC* risulta passato. Infine, nel caso in cui si ottenga un valore pluviometrico della stazione superiore alla *sogliaP*, ma la stima radar associata alla stazione stessa è inferiore alla *sogliaR*, il controllo *RCC* segnala una sottostima della misura radar indicandola come "*Sottostima radar*", senza però variare il QI della stazione in esame.

I risultati dell'*RCC*, assieme ai parametri di input di *Corkdet*, sono introdotti come input al Controllo di Coerenza Temporale (*TCC*). Il *TCC* verifica, per ciascuna stazione esaminata, se il valore pluviometrico misurato nell'istante della verifica corrisponde ad un valore prefissato di finestre temporali precedenti. Se questa condizione è soddisfatta, viene verificato che la stazione abbia fallito anche il controllo *RCC*, e se questa condizione è vera, il controllo *TCC* è fallito per la stazione in esame, con diminuzione del corrispettivo QI. Invece, se la stazione misura uno stesso valore di pioggia ripetuto nel tempo ma è coerente con l'*RCC*, il test è passato ed il QI mantenuto. Questa condizione è stata imposta per interpretare correttamente gli zero di misurazione in corrispondenza di assenza di pioggia osservata sia da strumentazione radar che dalla stazione esaminata. In condizioni di misure non ripetute il *TCC* è invece automaticamente passato.

Come ultimo controllo eseguito dalla funzione *CorkDet* vi è il Controllo di Coerenza Spaziale (SCC), con il quale viene eseguito il confronto dei valori pluviometrici di ciascuna stazione con quelli delle stazioni in sua prossimità. Come per i controlli precedenti, anche l'SCC riceve in ingresso i parametri ed i dati preelaborati da *CorkDet*, sebbene non dipenda come TCC da dati processati dalle altre funzioni di controllo precedenti. Con una funzione appositamente implementata “*Ricerca stazioni vicine*” si definisce un sottodominio di appartenenza per ciascuna stazione, del quale si definisce il decimo percentile ($Q10$) dei valori pluviometrici misurati dalle stazioni contenute al suo interno. Successivamente l'SCC confronta il valore pluviometrico della stazione analizzata con il $Q10$ della distribuzione. Nel caso in cui la misura eseguita è inferiore al decimo percentile di pioggia del sottodominio di appartenenza, la stazione in esame fallisce il controllo RCC, ed il suo QI risulta diminuito, segnalando anche una possibile sottostima del pluviometro attraverso uno specifico avviso. Se invece la stazione presenta un valore di pioggia misurata maggiore del $Q10$, l'SCC è passato e la stazione non vede ridotto il suo QI.

Al termine di questi controlli la funzione *CorkDet* giunge a chiusura e restituisce all'utente i dati elaborati.

4.2.3 Il plugin *SnowyDet*

In questo capitolo si illustra una funzione *plugin* della procedura *CorkDet*, ideata appositamente per riconoscere possibili interazioni dei fenomeni nevosi con la misurazione delle stazioni pluviometriche.

La procedura nasce dall'intento di venire a capo di un fenomeno abbastanza comune che riguarda la rete OMIRL durante la stagione invernale, ovvero l'occlusione dei pluviometri da parte della precipitazione solida durante l'evento nevoso e la misura di falsi valori di precipitazione maggiori di zero in corrispondenza di giornate con assenza di piogge. Questo evento è causato dalla presenza di neve accumulata all'interno dei pluviometri non riscaldati durante il precedente evento precipitativo e in fase di fusione.

Diventa quindi utile, in fase di utilizzo dei dati della rete pluviometrica, poter identificare con facilità questo fenomeno, per interpretarlo correttamente e per escludere malfunzionamenti di misura.

La funzione così sviluppata è stata denominata *SnowyDetective* o *SnowyDet*, e va ad integrare i dati processati da *CorkDet*.

La funzione infatti si occupa di associare, per la finestra di tempo considerata, il dato di temperatura di ciascuna stazione ai dati in output della funzione *CorkDet*. Successivamente viene verificato che il valore di temperatura, compreso tra soglie predefinite, sia compatibile con un evento di nevicata o fusione nivale, eseguendo il confronto con i valori pluviometrici e radar.

Le soglie predefinite per un possibile rilevamento di nevicata sono inizialmente preimpostate ad un valore massimo di $1^{\circ}C$, parametro utilizzato dai colleghi del settore Meteorologia di ARPAL. Per la verifica di fusione nivale vengono considerati un valore minimo di $1^{\circ}C$ e un massimo di $8^{\circ}C$. Questi parametri sono comunque modificabili dall'utilizzatore nel caso lo ritenesse opportuno. Di seguito si riporta la descrizione concettuale del plugin appena descritto.

Struttura del plugin *SnowyDet*

Si illustra di seguito lo schema concettuale utilizzato per la formulazione del *plugin SnowyDet*, con il supporto del seguente elaborato grafico (figura 4.4).

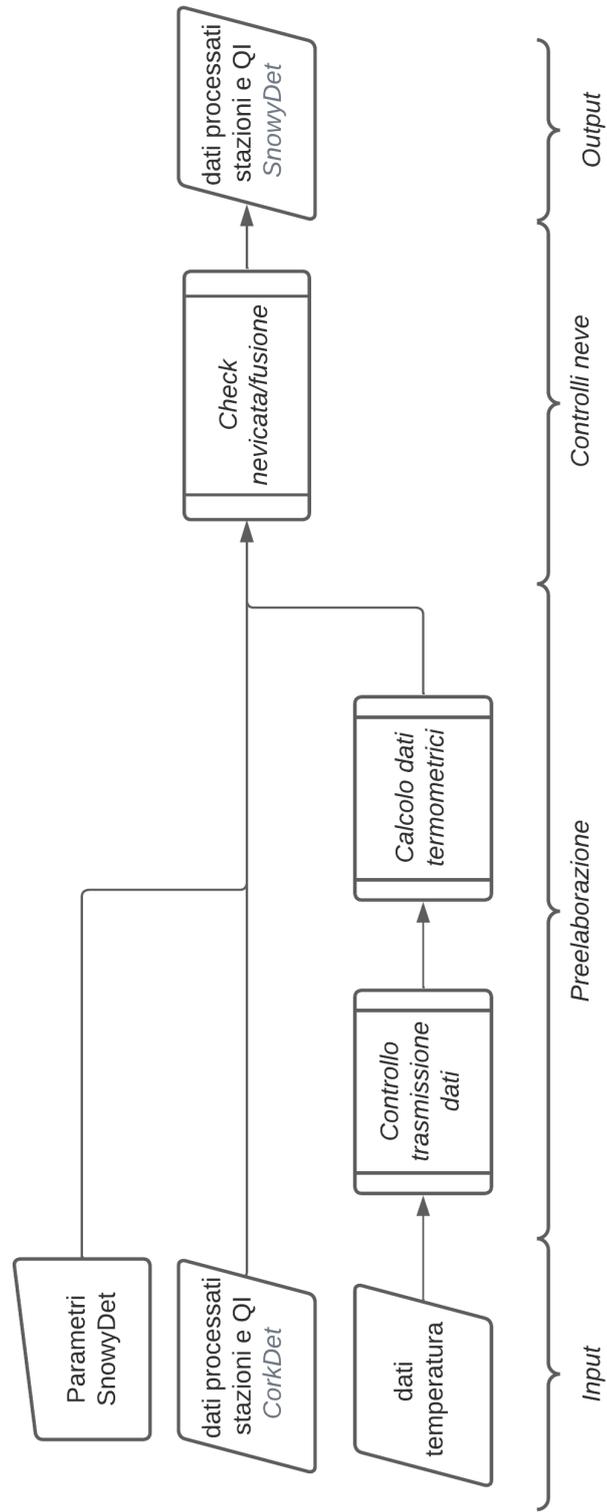


Figura 4.4: Schema concettuale di SnowyDet, plugin di CorkDet

SnowyDet riceve in ingresso i dati delle stazioni pluviometriche processati da *CorkDet*, i dati termometrici grezzi misurati dalle stazioni ed infine le soglie di temperatura preimpostate o scelte dall'utente.

Successivamente i dati termometrici grezzi sono sottoposti ad una preelaborazione iniziale, analoga a quella seguita all'interno di *CorkDet* per i dati pluviometrici, con verifica della corretta trasmissione del dato da parte delle stazioni al DB.

Quindi si esegue una media mobile dei dati termometrici sulla stessa finestra temporale dei dati in uscita da *CorkDet*, associando così a ciascuna stazione analizzata precedentemente il valore di temperatura corrispondente nella finestra temporale considerata. Successivamente si procede per ciascuna stazione ai controlli di:

- Possibile nevicata in corso.
- Possibile fusione nivale all'interno del pluviometro.

Di seguito si propone la rappresentazione grafica (in figura 4.5) dei controlli logici implementati all'interno di *SnowyDet*.

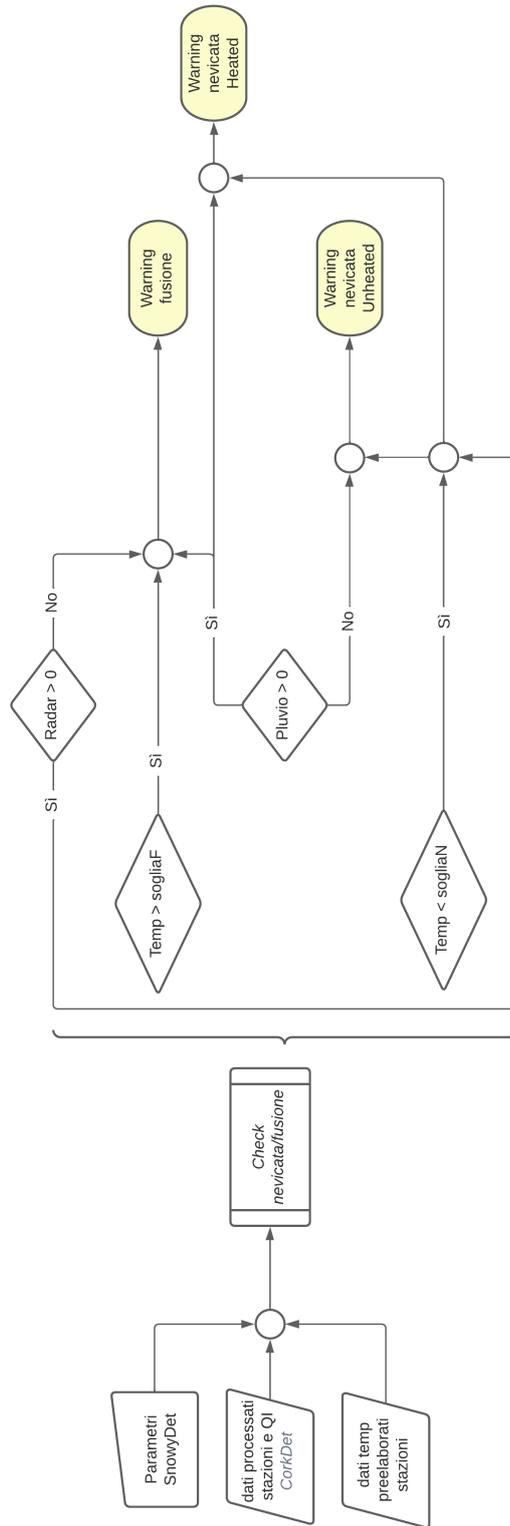


Figura 4.5: Schema logico dei controlli implementati in SnowyDet, plugin di CorkDet

Il controllo viene eseguito confrontando la temperatura della stazione con la soglia massima di temperatura perché possa avvenire una nevicata (*sogliaNmax*), definita nei parametri in entrata al *plugin*.

Nel caso in cui si sia verificato che questa è inferiore a (*sogliaNmax*), si osserva se la misura radar associata alla stazione rileva un evento precipitativo in corso.

Se questa condizione è soddisfatta, la funzione indica un avvertimento di possibile nevicata in corso tramite “*Warning nevicata*”. Inoltre, la procedura specifica se si tratta di una nevicata per un pluviometro riscaldato (“*Warning nevicata heated*”), che quindi rileva un flusso al suo interno, oppure se questo è dotato di un sensore non riscaldato, che può ragionevolmente essere stato ostruito dalla neve accumulata (“*Warning nevicata unheated*”).

Se invece la temperatura misurata dalla stazione è maggiore di una soglia minima di fusione nivale *sogliaFmin*, la procedura confronta la misura radar e quella pluviometrica registrata dalla stazione. Se si osserva pioggia misurata dallo strumento, ma il radar non rileva eventi in atto, l’algoritmo segnala all’utente un caso di possibile fusione nivale.

Infine, si precisa che l’algoritmo, non riporta alcun avvertimento aggiuntivo nel caso non fosse possibile verificare le condizioni sopra elencate.

Capitolo 5

Discussione sul metodo proposto

5.1 Applicazione di *CorkDetective* ad eventi di pioggia passati

Il metodo proposto nel paragrafo 4.2 è stato provato su un discreto numero di eventi di pioggia passati, quindi in modalità *offline*, per osservare il riscontro pratico delle tecniche di controllo sviluppate.

Gli eventi testati vanno dall'anno 2017 a quello corrente (2023), con una predilezione per gli eventi autunnali ed invernali, sebbene siano stati testati anche eventi primaverili ed estivi.

Per brevità, si riporta di seguito uno degli eventi osservati a titolo d'esempio, considerato decisamente significativo dal momento che si sono presentati ben tre possibili casi di malfunzionamento legati all'acquisizione delle misure pluviometriche. Infatti, l'evento del 08.12.2022 - 09.12.2022 è l'unico analizzato che presenta un caso di occlusione totale di un pluviometro, due casi di occlusione temporanea per neve e un caso di sottostima di misura.

5.1.1 Risultati di CD per l'evento del 08.12.2022 - 09.12.2022

Nella seguente sezione si riporta un caso applicativo della procedura sviluppata nei capitoli precedenti. Si presenta infatti una applicazione in *back analysis* dell'algoritmo *CorkDetective*, analizzando l'evento di pioggia che ha interessato la regione Liguria nelle giornate dell'8 e del 9 dicembre 2022, simulando quindi una possibile evoluzione in tempo reale del metodo.

L'andamento temporale dell'evento viene di seguito riportato tramite l'uso di rappresentazioni cartografiche, che mostrano l'evoluzione temporale delle perturbazioni tramite le immagini radar e l'andamento globale dell'indice di qualità delle stazioni, prodotto da CorkDetective. Di seguito non viene riportato l'intero l'evento del 08.12.2022-09.12.2022, ma solo due immagini significative per l'illustrazione grafica dei risultati del metodo (figure 5.1 e 5.2), riportando l'evento per intero in appendice A.

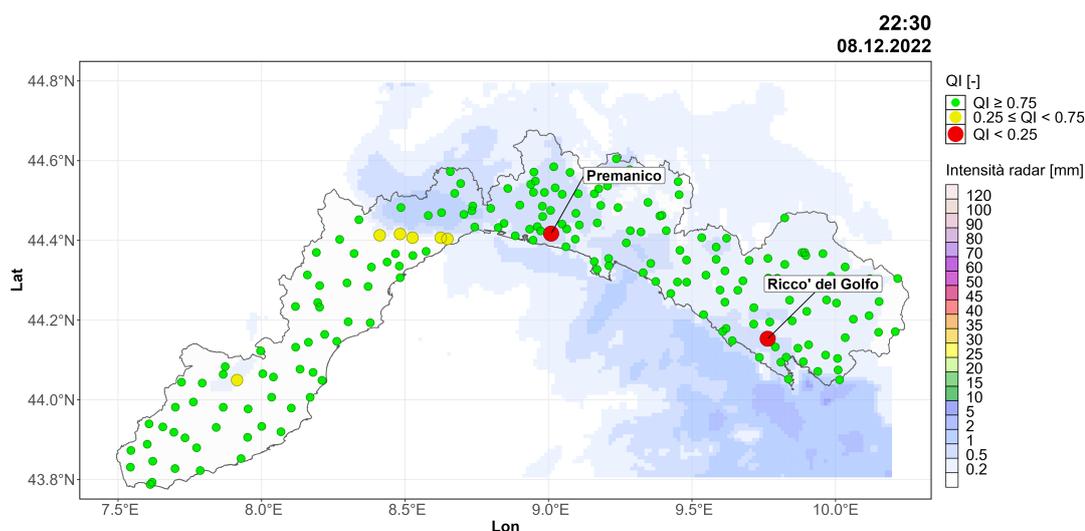


Figura 5.1: La rappresentazione dello stato di qualità della rete alle ore 22:30 del 08.12.2022

Verso le 20:30 del 08.12.2022 un fronte di pioggia comincia ad interessare nello specifico l'estremo ponente e l'estremo levante ligure, riportando una possibile anomalia di misura ($QI=0$) per la stazione di Riccò del Golfo.

Nel seguito la perturbazione sembra stabilizzarsi nel centro-levante ligure, confermando l'anomalia sulla stazione di Riccò del Golfo in modo ininterrotto fino alle 23:00, istante nel quale la perturbazione sembra essersi temporaneamente esaurita.

In questa sequenza temporale vi sono anche altre stazioni che riportano dei valori di QI nulli (Albenga-Molino Branca e Genova-centro Funzionale), ma in particolare la stazione di Premanico sembra presentare una anomalia più persistente, dalle 21:30 alle 22:30.

Alle 04:00 del 09.12.2022 un nuovo fronte, più esteso di quello della sera prima, interessa l'intera regione. L'anomalia rilevata da CD si mantiene costante per la

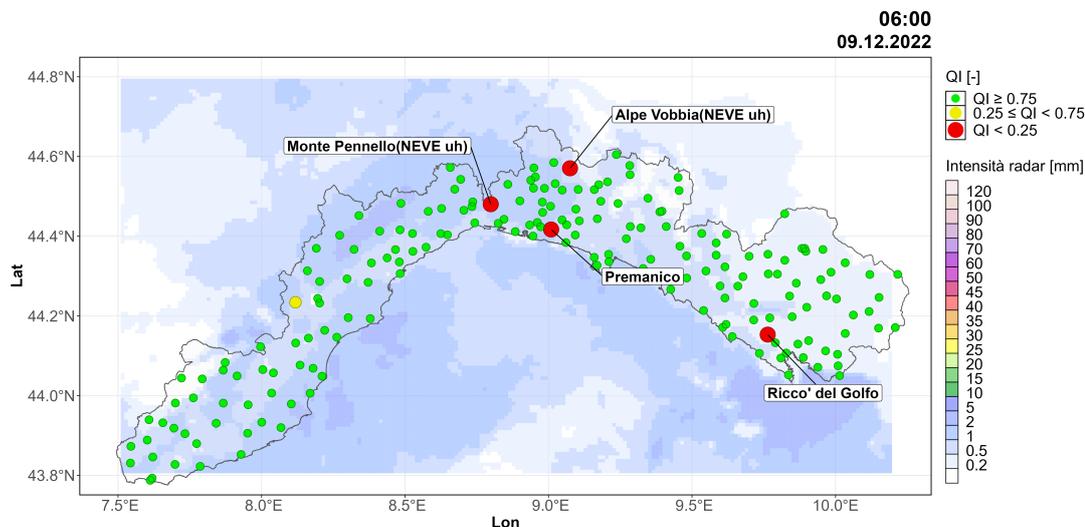


Figura 5.2: La rappresentazione dello stato di qualità della rete alle ore 06:00 del 08.12.2022

stazione di Riccò del Golfo dalle 04:00 alle 06:00, dopodiché la perturbazione si concentra sul centro-ponente ligure fino alle 09:00.

Inoltre, è possibile osservare che in questo intervallo temporale altre tre stazioni riportano una misurazione di bassa qualità in maniera stabile nel tempo. Queste sono le stazioni di:

- Premanico (dalle 05:00 alle 06:30)
- Monte Pennello (dalle 05:00 alle 09:00)
- Alpe Vobbia (dalle 05:30 alle 09:00)

La stazione di Monte Pennello presentava già alle 04:30 del 09.12 un QI non unitario, come anche la stazione di Premanico dalle 08:00 del 09.12.

Dopo le 09:00 del 09.12 la perturbazione torna ad essere persistente anche sul levante ligure, quando la stazione di Riccò del Golfo torna a manifestare un comportamento sospetto, con un QI < 0.75 già alle 08:30 che si riduce a zero dalle 09:00 fino alle 11:00, quando la perturbazione sembra esaurirsi. In questa finestra temporale anche la stazione di Alpe Vobbia mantiene un indice di qualità costantemente nullo fino alle 10:30, mentre quelle di Premanico e Monte Pennello oscillano tra un QI inferiore di 0.75 e QI=0.

Inoltre, si osserva che l'algoritmo CD riporta un avviso di possibile nevicata in corso per le stazioni di Monte Pennello e Alpe Vobbia, durante tutti gli istanti

in cui queste stazioni possiedono un QI nullo, si ipotizza quindi che l'anomalia di misura possa essere dovuta all'occlusione di un sensore non riscaldato (**uh**) da parte della precipitazione solida.

Per interpretare i possibili comportamenti anomali che hanno portato a valori continuativi di $QI=0$, nel seguente paragrafo si analizzano gli andamenti complessivi di ciascuna stazione sospetta di criticità di misura durante l'intero evento, comparando le loro misurazioni di pioggia con quelle delle stazioni geograficamente più prossime e con le misure radar, ipotizzando che queste ultime informazioni possano essere rappresentative della dinamica locale dell'evento di pioggia.

5.1.2 Stazione di Riccò del Golfo (SP)

La stazione pluviometrica di Riccò del Golfo è installata presso l'omonima località in Provincia di La Spezia, posizionata nel punto di coordinate Lat: $44,15319^\circ$ e Lon: $9,76373^\circ$ ad una quota di 150 m s.l.m.. La stazione, situata all'interno del bacino idrografico del fiume Magra, monitora le piogge con una accuratezza temporale pari a cinque minuti.

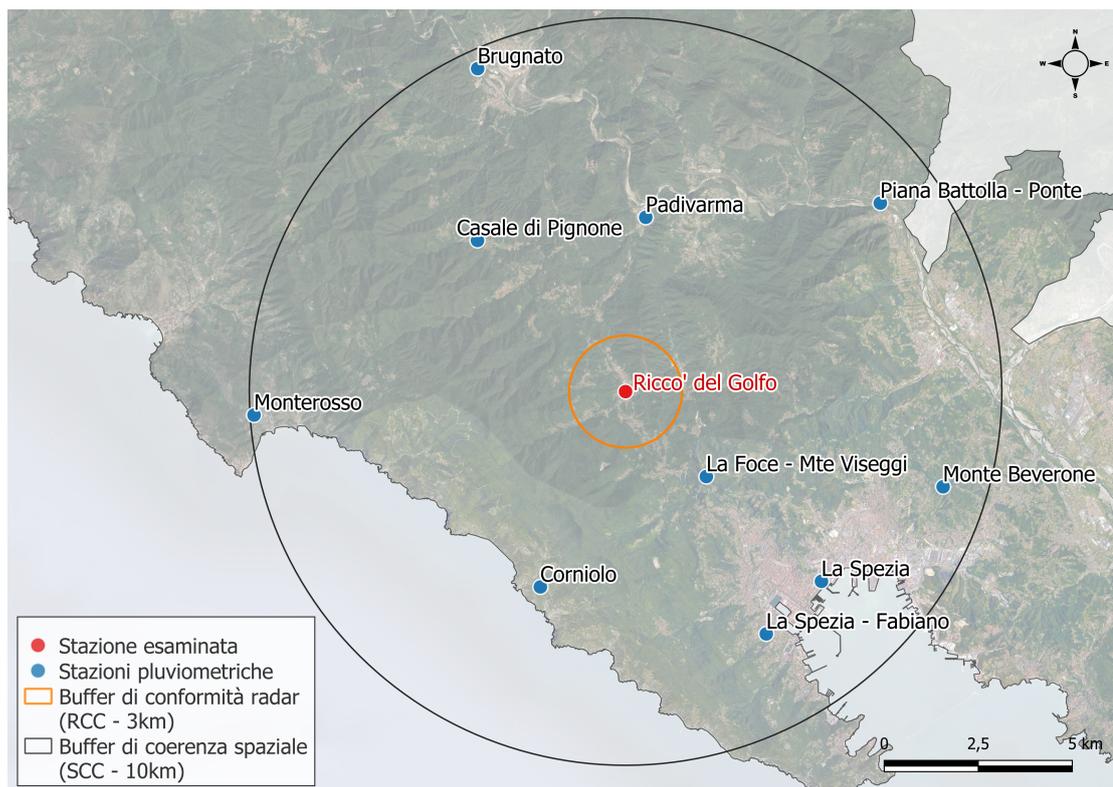


Figura 5.3: *Rappresentazione geografica della stazione di Riccò del Golfo*

Si riporta (figura 5.3) il supporto cartografico in modo tale da poter visualizzare immediatamente la sua collocazione spaziale e le stazioni utilizzate per l'analisi locale delle piogge.

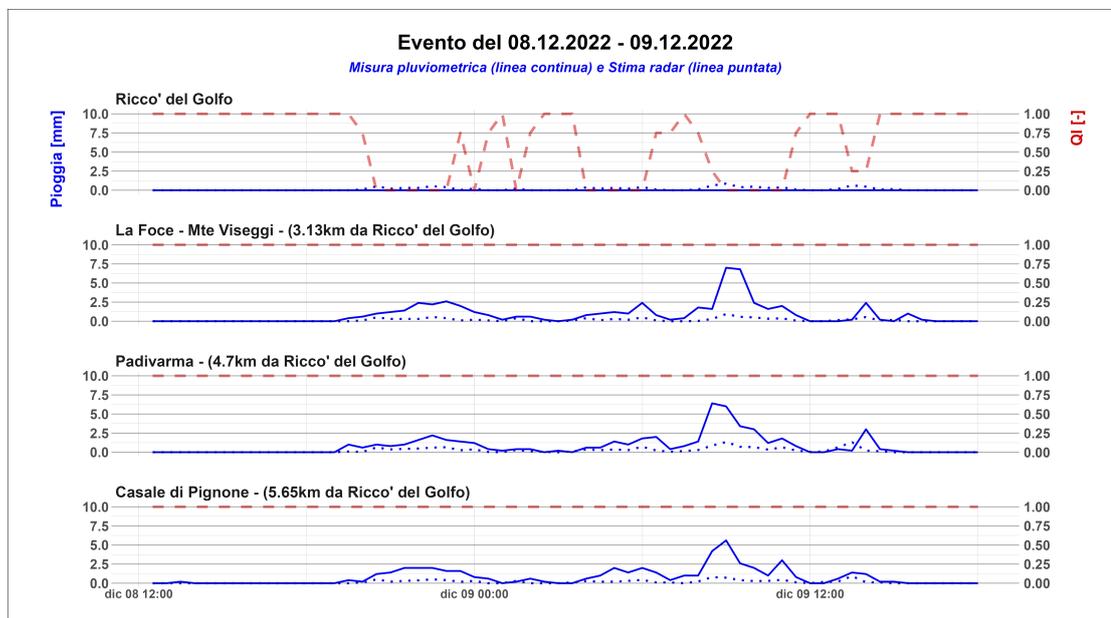


Figura 5.4: *Andamento complessivo delle misure di precipitazione ed indice di qualità (QI) per la stazione di Riccò del Golfo e delle tre stazioni più prossime*

Si osservano quindi innanzitutto le misurazioni della stazione di Riccò del Golfo e delle cinque stazioni più vicine ad essa.

È immediato osservare che il comportamento della stazione è sospetto, dal momento che la cumulata complessiva per la stazione di Riccò del Golfo è nulla contro i 53.4 mm della stazione di La Foce, posta a soli 3.13 km, ed i 46.4 mm medi delle 10 stazioni poste a meno di 10 km dalla stazione di Riccò del Golfo.

Inoltre, la correlazione molto elevata tra le precipitazioni misurate dalle stazioni prossime a quella di Riccò del Golfo fa presagire un blocco meccanico della strumentazione di questa stazione.

Questa ipotesi è convalidata dall'osservazione delle stime radar, che sebbene molto deboli confermano la presenza di un evento di precipitazione in prossimità della stazione di Riccò del Golfo. La sottostima radar può essere motivata dalla debolezza del segnale di ritorno all'antenna ricevente posta su Monte Settepani, a circa 125 km di distanza dalla stazione di Riccò del Golfo.

Infatti, la distanza che potrebbe essere definita quasi al limite di operatività dello strumento, definita pari a 150 km [22], e l'elevato numero di barriere orografiche naturali presenti possono influenzare molto la sottostima radar, e l'esempio

analizzato ne può essere un'evidenza pratica.

Il sospetto di occlusione della stazione di Riccò del Golfo durante l'evento di pioggia del 08.12.2022-09.12.2022 è stato confermato dal settore Reti di ARPAL, che ha verificato l'effettiva ostruzione della stazione durante l'intero evento.

Questo fatto è di estrema importanza, in quanto risulta essere una prima dimostrazione reale della buona applicabilità del metodo per l'individuazione di stazioni pluviometriche ostruite. Infatti già osservando in *real-time* l'andamento spazio-temporale dell'indice QI prodotto da CorkDetective sarebbe stato intuibile, come poi confermato, un problema di occlusione del sistema di misura pluviometrica della stazione di Riccò del Golfo.

5.1.3 Stazione di Premanico (GE)

La stazione pluviometrica di Premanico è installata presso l'omonima località all'interno del Comune di Genova, con coordinate geografiche Lat: 44,41681° e Lon: 9,00911° ad una quota di 234 m s.l.m..

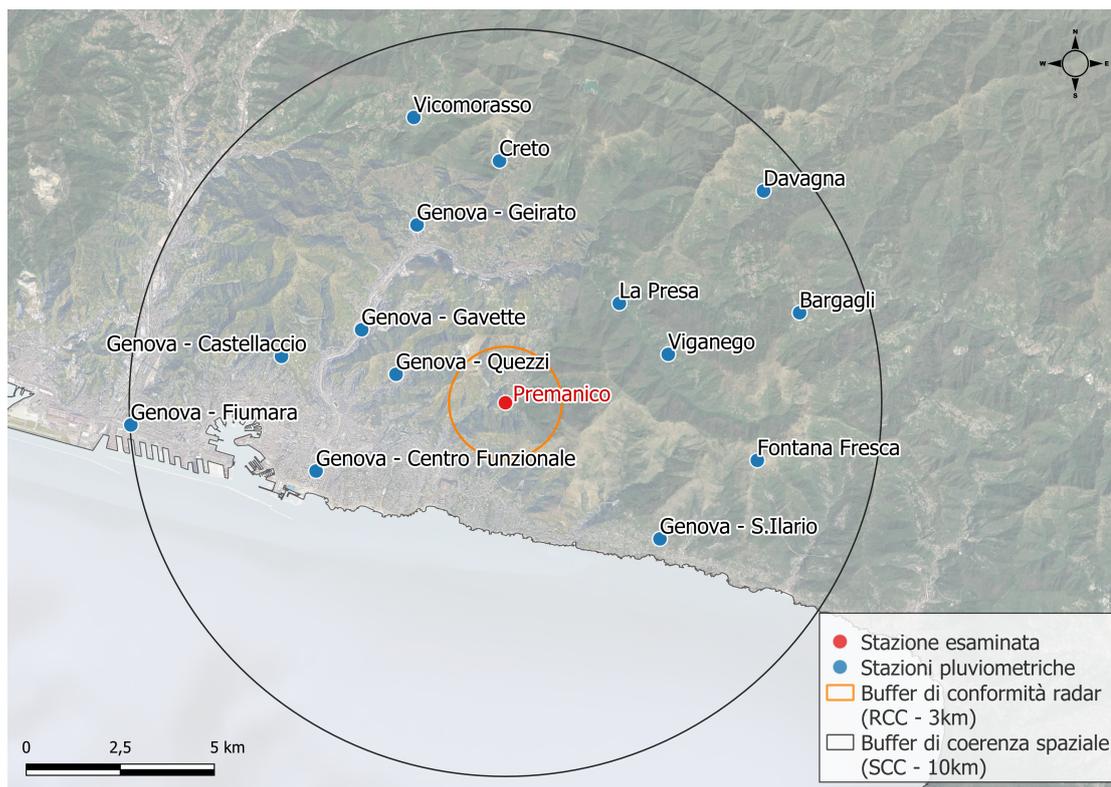


Figura 5.5: Rappresentazione geografica della stazione di Premanico

La stazione registra le precipitazioni con una accuratezza temporale pari a cinque minuti, monitorando gli eventi che interessano il bacino del Torrente Bisagno, poiché posizionata su un piccolo bacino che alimenta quest'ultimo.

Si riporta in figura 5.5 il supporto cartografico che permette di visualizzare la sua collocazione spaziale e l'ubicazione delle stazioni utilizzate per l'analisi locale dell'evento.

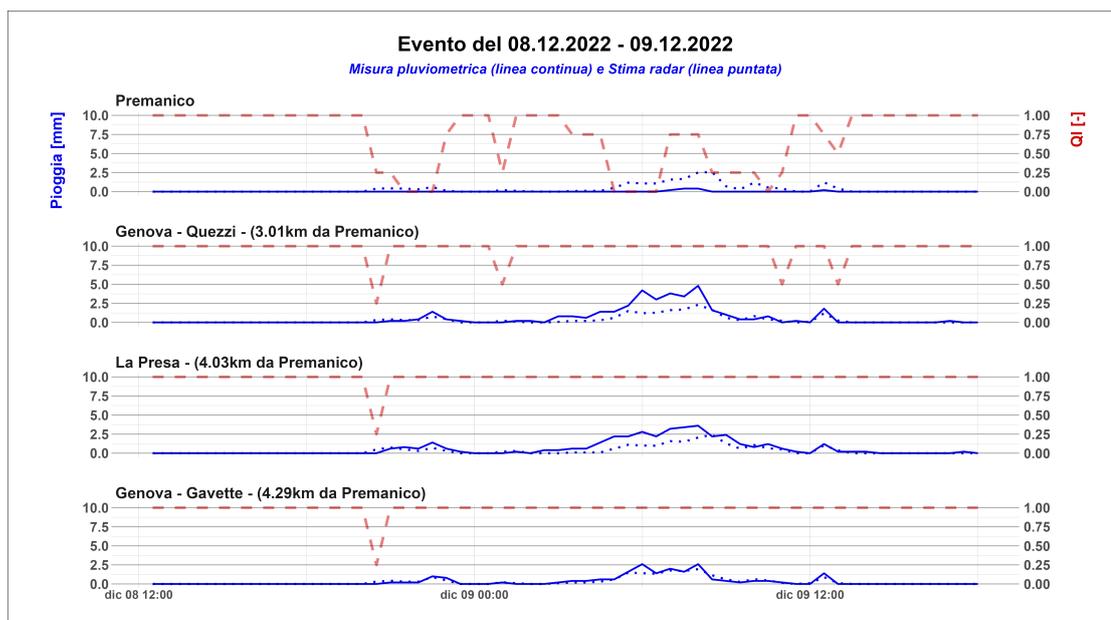


Figura 5.6: *Andamento complessivo delle misure di precipitazione ed indice di qualità (QI) per la stazione di Premanico e delle tre stazioni più prossime*

Di seguito si riporta l'evoluzione temporale (in figura 5.6) delle piogge misurate dalla stazione di Premanico ed un confronto con le stazioni più prossime a questa. È immediato osservare l'andamento molto variabile dell'indice di qualità (in rosso) per la stazione analizzata, decisamente più accentuato rispetto a quello delle stazioni vicine. Inoltre, risulta sospetta l'evoluzione temporale della precipitazione misurata (in blu), in quanto per la stazione di Premanico risulta praticamente nulla, con una cumulata totale di 1.2 mm, contro i 29.56 mm delle 15 stazioni a meno di 10 km da Premanico.

Osservando la stima radar relativa alla zona in cui è ubicata la stazione di Premanico è possibile notare che questa conferma l'effettiva presenza di un evento precipitativo durante la finestra temporale analizzata. Si aggiunge che anche in questo caso la stima radar sia leggermente sottostimata rispetto alle misure delle stazioni riportate in figura 5.6, sebbene in modo meno significativo rispetto alla zona del levante ligure.

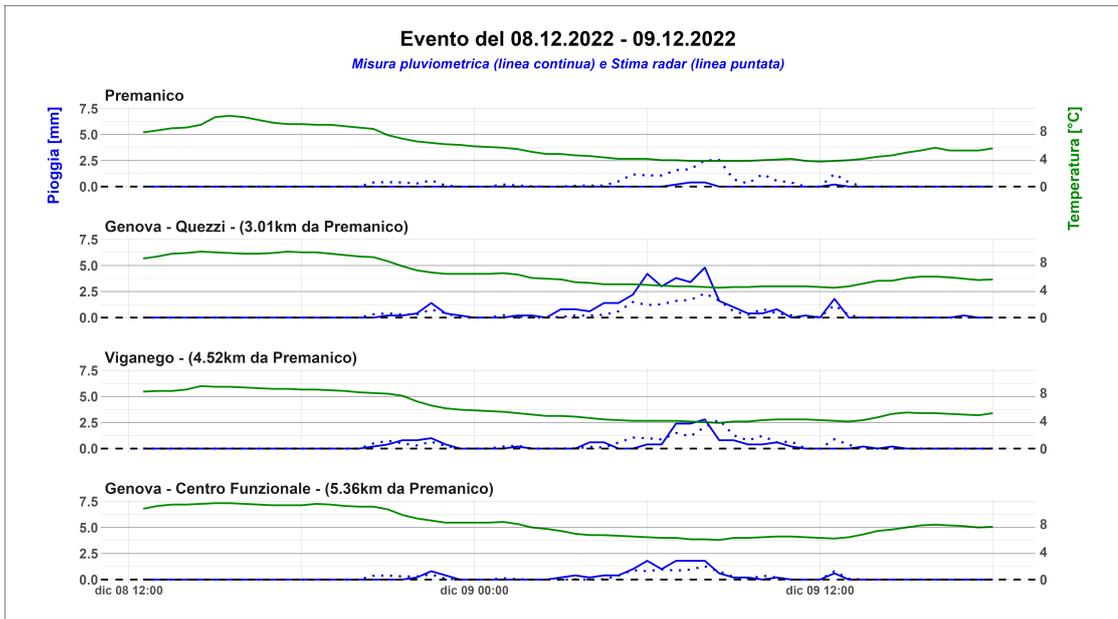


Figura 5.7: *Andamento complessivo delle misure di precipitazione e di temperatura per la stazione di Premanico e delle tre stazioni più prossime*



Figura 5.8: *Immagine recente (dicembre 2022) della stazione di Premanico (Fonte Archivio ARPAL)*

Una cumulata non nulla non si può attribuire ad una stazione con un problema di occlusione, o per lo meno ad una occlusione già avvenuta. È però evidente che una sottostima è fortemente presumibile, sebbene l'ipotesi che questa avvenga in seguito ad una precipitazione nevosa è poco plausibile, poiché la temperatura di Premanico si mantiene costantemente maggiore di 0°C durante tutto l'evento (figura 5.7).

Come nel caso di Riccò del Golfo, anche la sottostima della stazione di Premanico è stata confermata dalla divisione Monitoraggio Reti di ARPAL, a causa della vegetazione intorno alla stazione (come si può intuire dalla figura 5.8).

Questa ulteriore conferma pratica è una ulteriore prova significativa dell'effettiva funzionalità di *CorkDetective*, in quanto mostra che l'algoritmo CD è in grado di identificare anche gli difficilmente individuabili casi di sottostima pluviometrica.

5.1.4 Stazione di Alpe Vobbia (GE)

La stazione pluviometrica di Alpe Vobbia è installata presso l'omonima località situata all'interno della Città Metropolitana di Genova, posizionata nel punto di coordinate Lat: $44,57032^{\circ}$ e Lon: $9,07492^{\circ}$ ad una quota di 1082 m s.l.m..

La stazione si trova all'interno del bacino idrografico del Torrente Scrivia, ed è dotata di un sensore pluviometrico con accuratezza temporale pari a dieci minuti. Si riporta la sua collocazione spaziale e quella delle stazioni poste nelle sue vicinanze (figura 5.9).

Anche per la stazione di Alpe Vobbia è possibile riscontrare un comportamento simile a quello di Premanico, con un sospetto di sottostima ma con esclusione di una occlusione totale del pluviometro (figura 5.10). La cumula di pioggia sull'intero evento è infatti pari a 9.6 mm contro i 34.56 mm medi delle otto stazioni più prossime. Inoltre, la stima radar in prossimità di Alpe Vobbia appare correlata con quelle delle stazioni nelle vicinanze, avvallando così l'ipotesi che durante la mattina del 09.12 sia effettivamente occorso un evento di precipitazione in corrispondenza della stazione di Alpe Vobbia, da questa tuttavia non rilevato.

In questo caso però l'ipotesi occlusione nivale dello strumento risulta plausibile, in quanto la sottostima si manifesta nella sola finestra temporale in cui temperatura si mantiene decisamente inferiore a 0°C , come si può osservare in figura 5.11.

5.1.5 Stazione di Monte Pennello (GE)

La stazione pluviometrica di Monte Pennello è ubicata presso l'omonima altura del genovesato, posizionata nel punto di coordinate Lat: $44,48017^{\circ}$ e Lon: $8,79867^{\circ}$ ad una quota di 980 m s.l.m.. La stazione è situata sullo spartiacque dei due bacini marittimi dei Torrenti Varenna e Leira e del bacino Padano del Torrente

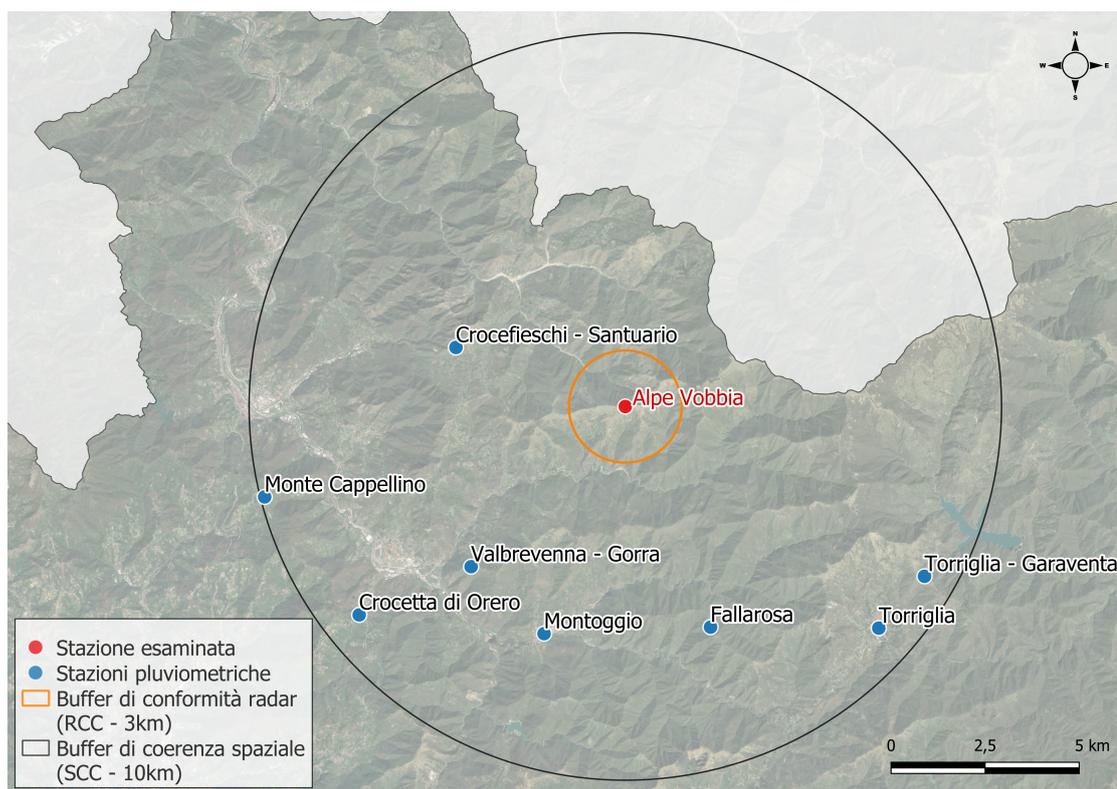


Figura 5.9: *Rappresentazione geografica della stazione di Alpe Vobbia*

Stura, registrando le piogge con una accuratezza temporale pari a cinque minuti. Si riporta di seguito (figura 5.12) il supporto cartografico con la sua collocazione spaziale e le stazioni utilizzate per l'analisi locale delle piogge.

Per quanto riguarda l'analisi temporale di Monte Pennello, questa è simile a quella riportata per la stazione di Alpe Vobbia. Infatti, è sospettabile una sottostima della stazione in esame, che presenta una precipitazione cumulata sull'intero evento pari al 20% della media della cumulata delle otto stazioni più vicine, ed in particolare una cumulata nulla nella mattina tra l'08.12 ed il 09.12, finestra temporale di maggior intensità dell'evento, come dimostrano le misure delle stazioni nelle vicinanze e la stima radar in corrispondenza della stessa stazione di Monte Pennello (figura 5.13). Anche in questo caso la probabile sottostima è di oclusione nivale del pluviometro, come dimostra l'andamento termometrico riportato, stabile sotto gli 0°C durante la fase di maggior intensità dell'evento (figura 5.14).

In questo caso la differenza tra la stima radar e la misura pluviometrica è praticamente nulla per le stazioni poste nei 10 km che circondano la stazione di Monte Pennello, ed i due andamenti tendono a ripetersi nel tempo. Questo fatto è

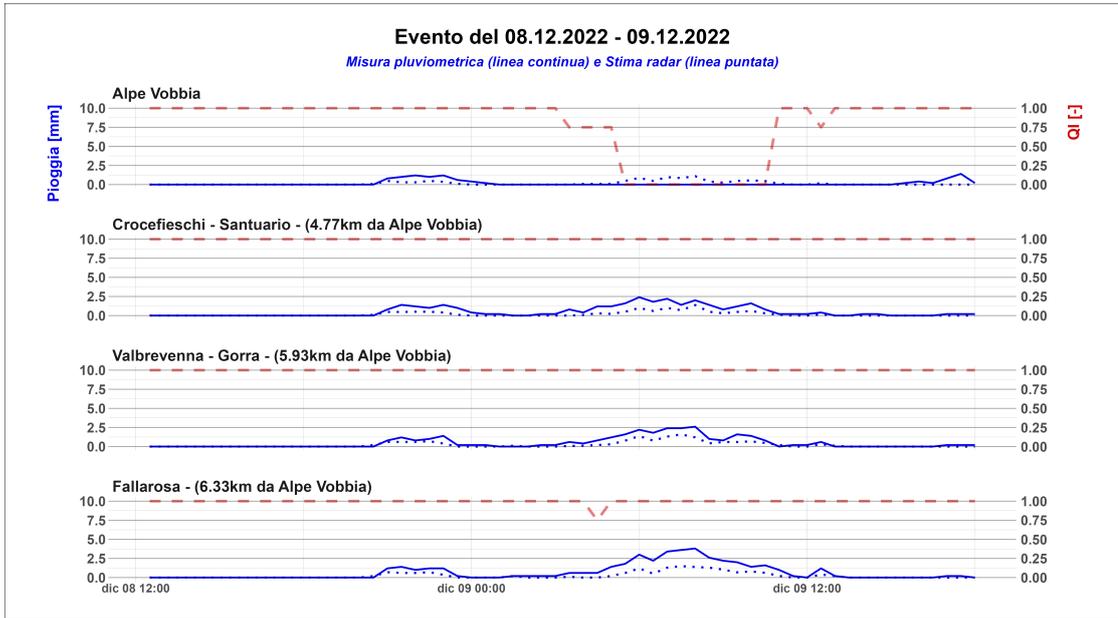


Figura 5.10: Andamento complessivo delle misure di precipitazione ed indice di qualità (QI) per la stazione di Alpe Vobbia e delle tre stazioni più prossime

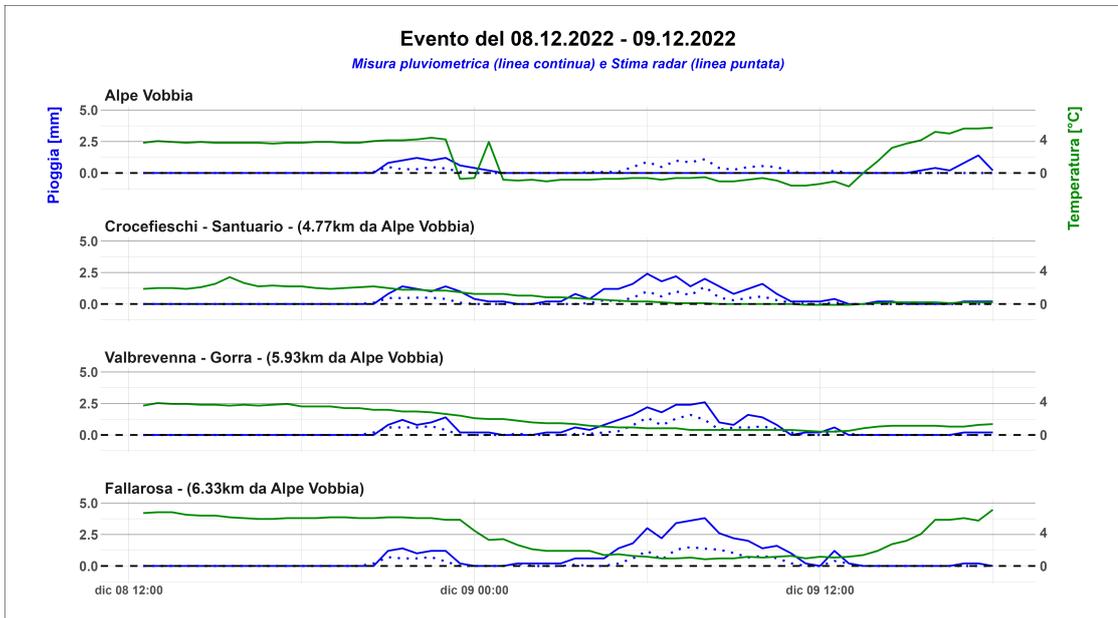


Figura 5.11: Andamento complessivo delle misure di precipitazione e di temperatura per la stazione di Alpe Vobbia e delle tre stazioni più prossime

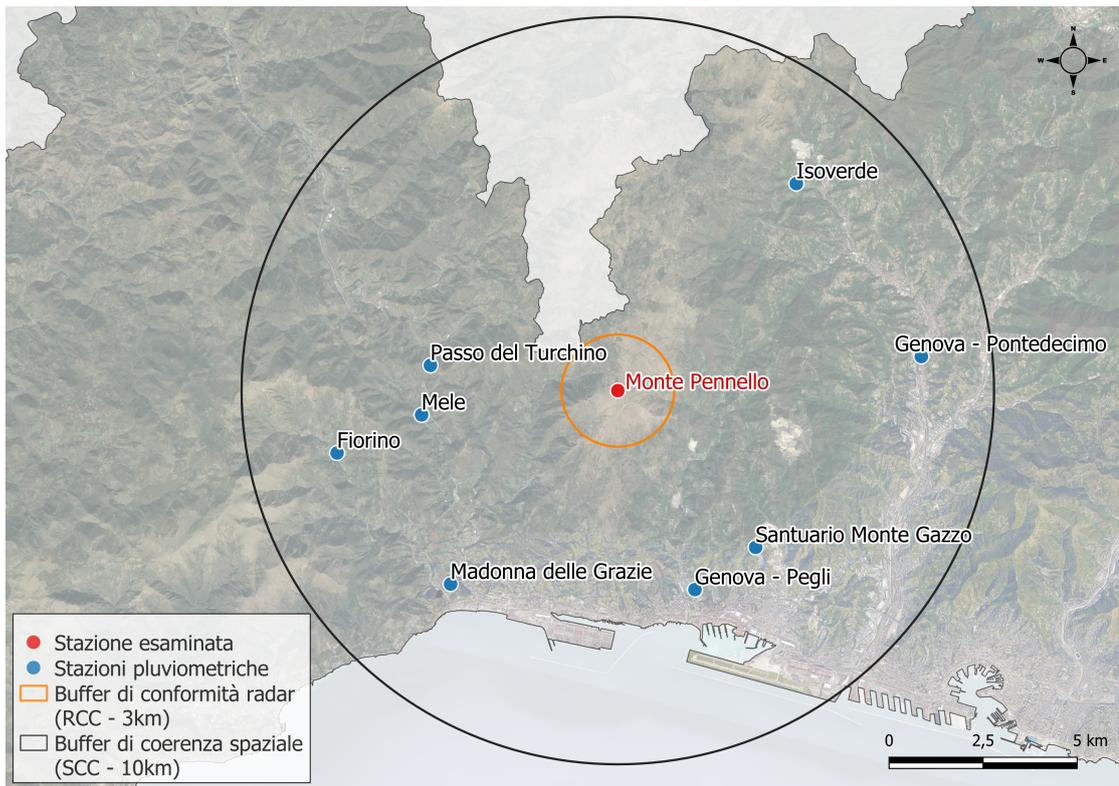


Figura 5.12: *Rappresentazione geografica della stazione di Monte Pennello*

anche riscontrabile nel caso delle stazioni di Alpe Vobbia e Premanico, sebbene in maniera meno evidente, mentre non è riscontrabile con le misurazioni delle stazioni poste in prossimità di Riccò del Golfo. Questo risultato potrebbe essere spiegato dal fatto che la stazione di Monte Pennello si trova ad una distanza di soli 54 km dall'antenna di Monte Settepani, contro i 125 km del Levante. Inoltre Monte Pennello è posto ad una quota di quasi mille metri sul livello del mare. Questo comporta un minore fenomeno di *blocking* del segnale radar, con conseguente inferiore attenuazione del segnale ricevuto dall'antenna.

5.2 Possibili migliorie e limitazioni del metodo

Come è stato dimostrato dall'applicazione della procedura *CorkDetective* ad un evento recente (paragrafo 5.1), il metodo sembra raggiungere con successo l'obiettivo per il quale è stato sviluppato. È importante ricordare che la procedura si è dimostrata efficace nel riconoscere criticità di acquisizione da parte delle stazioni pluviometriche in numerosi eventi testati, di cui l'evento al paragrafo 5.1 è solo un significativo esempio esplicativo.

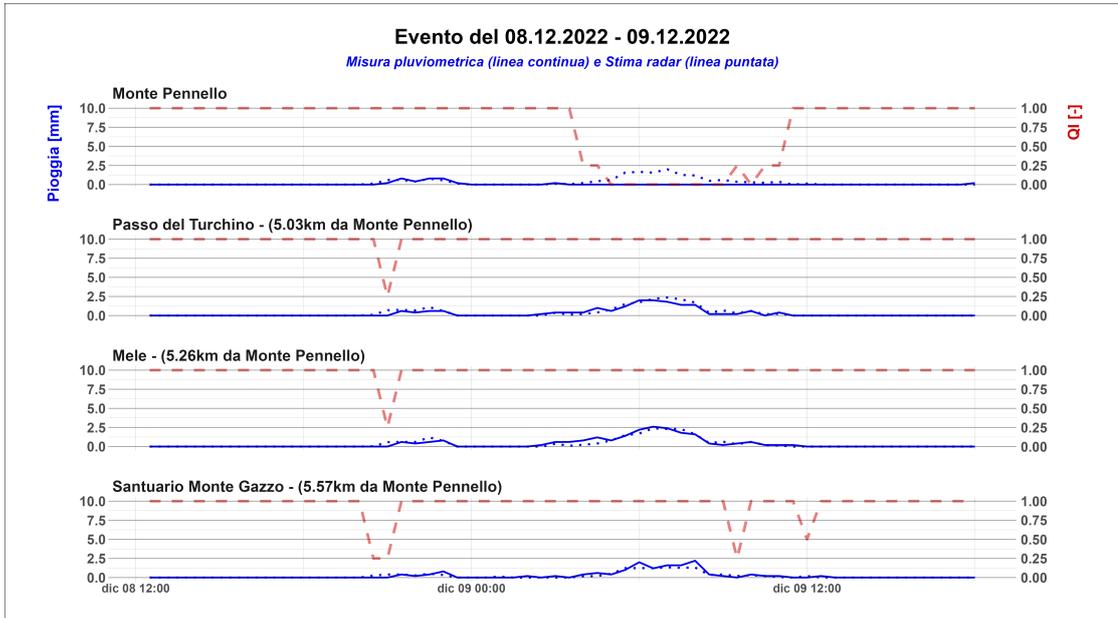


Figura 5.13: Andamento complessivo delle misure di precipitazione ed indice di qualità (QI) per la stazione di Monte Pennello e delle tre stazioni più prossime

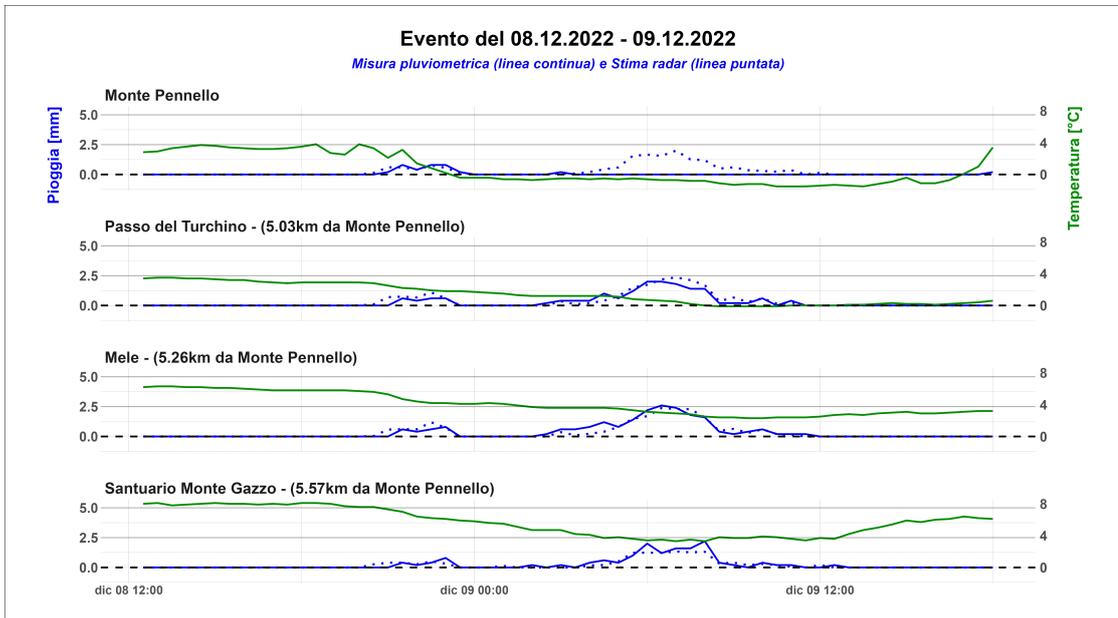


Figura 5.14: Andamento complessivo delle misure di precipitazione e di temperatura per la stazione di Monte Pennello e delle tre stazioni più prossime

I parametri di controllo sono stati preimpostati su valori di primo tentativo, dettati da considerazioni fisiche, ma un attento lavoro di calibrazione dei parametri utilizzati renderebbe la procedura ancora più robusta ed estendibile a numerosi altri casi studio sul territorio nazionale.

In mancanza di un numero elevato di eventi pregressi, nel caso analizzato non è stato possibile eseguire una calibrazione dei parametri della procedura sebbene sia stata eseguita una validazione del metodo basata su alcuni eventi di pioggia avvenuti negli ultimi anni.

La generazione di numerosi eventi sintetici che ricalchino la struttura di quelli reali potrebbe essere la chiave per raggiungere la desiderata robustezza del metodo.

Quindi uno sviluppo futuro del metodo potrebbe essere composto da un primo passaggio di:

- Individuazione di un soddisfacente numero di casi confermati di malfunzionamento delle stazioni.
- Catalogazione e studio delle caratteristiche dei casi di malfunzionamento passati.
- Generazione di un ingente numero di eventi sintetici basati sullo studio dei casi di malfunzionamento reali.

Avendo quindi a disposizione un *dataset* esteso ed affidabile, la procedura di calibrazione del metodo, e la sua successiva validazione, sarebbero decisamente ben supportate.

Inoltre, potrebbe essere di notevole aiuto l'utilizzo di tecniche di *Machine Learning*, che darebbero la possibilità di elaborare in maniera efficace la grande quantità di informazioni raccolte e generate [32].

Infine, potrebbe essere conveniente eseguire la scelta dei parametri del metodo in maniera non uniforme sull'intera area analizzata per poter tenere in conto l'elevata variabilità spaziale delle piogge [6].

Un ulteriore sviluppo del metodo proposto potrebbe essere quello di adottare una procedura di scelta dei parametri di *CorkDetective* attraverso una metodologia geostatistica ormai comune nella pratica idrologica [7].

Il metodo proposto è in grado di identificare correttamente le stazioni che presentano malfunzionamenti di raccolta del dato pluviometrico, quali occlusioni o sottostime. L'implementazione di un ulteriore controllo basato su un confronto del dato del campo di vento potrebbe rappresentare una notevole fonte aggiuntiva di informazioni sulle cause di sottostima delle stazioni. Di conseguenza potrebbero essere presi in considerazione spostamenti dell'ubicazione delle stazioni critiche o opportune modifiche ambientali del sito in cui si trovano (secondo le indicazioni WMO [6]).

Anche il controllo implementato da *SnowyDetective* potrebbe essere reso più robusto dall'utilizzo di un'affidabile fonte di informazione circa il campo di copertura nevosa al suolo, integrandolo all'interno dei controlli già previsti.

Conclusioni

Il metodo di monitoraggio della rete pluviometrica ligure sviluppato in questo lavoro si è dimostrato efficace nel riconoscere situazioni critiche e di malfunzionamento nell'acquisizione del dato di pioggia dei pluviometri.

In particolare, l'algoritmo *CorkDetective* è stato in grado di riconoscere correttamente casi di occlusione della bocca di raccolta dei pluviometri, causati dalla deposizione di materiale fine o da precipitazione nevosa, distinguendo i due casi grazie al *plugin SnowyDetective*. Inoltre, il metodo si è anche dimostrato efficace nel riconoscere casi di sottostima della misura di pioggia, la cui individuazione è decisamente più ostica, poiché si manifestano in modo poco prevedibile e disomogeneo.

I casi di misure di pioggia non attendibili possono essere più frequenti di quanto ci si immagini, non solo in corrispondenza di stazioni pluviometriche ostruite, ma anche di stazioni che tendono a sottostimare gli effettivi afflussi a causa della natura della precipitazione (come degli eventi di tipo nevoso) e di interazione con l'intorno del luogo di installazione (vegetazione, flussi ventosi localizzati, ecc.).

Il risultato ottenuto è ancor più soddisfacente dal momento che l'architettura di *CorkDetective* risulta di immediata visualizzazione e comprensione da parte di un futuro utilizzatore, che potrà agevolmente sfruttare al massimo le potenzialità dell'algoritmo.

Grazie alla sua funzionalità e intuitiva applicabilità, l'algoritmo *CorkDetective* ed il *plugin SnowyDetective* sono già in fase di sperimentazione operativa per il monitoraggio in tempo reale della rete pluviometrica dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure (ARPAL).

L'utilizzo di un sistema di monitoraggio in tempo reale può quindi permettere di individuare le suesposte situazioni critiche, sostenendo scelte più idonee di intervento sulla rete pluviometrica monitorata.

Inoltre, grazie alla individuazione dei malfunzionamenti di misura delle stazioni è possibile eseguirne una catalogazione dettagliata e numerosa, la cui analisi critica

potrà comportare una prevenzione degli stessi per future installazioni, sia a livello di sensori implementati che di ubicazione spaziale scelta.

Si è anche osservato come sia di fondamentale importanza (nello stato di avanzamento tecnologico attuale) l'integrazione del dato pluviometrico a terra con il dato di stima radar, spesso soggetto a sottostime dovute ai propri vincoli strumentali. È quindi decisivo, soprattutto per una ottimale pianificazione di protezione civile e gestione del rischio idrogeologico, poter fare riferimento a dati affidabili sugli effettivi afflussi meteorici.

Sono stati evidenziati anche i possibili limiti e di conseguenza i margini di miglioramento del lavoro svolto fin'ora, poiché non è stato possibile definire un rigoroso processo di calibrazione del metodo basato su un'estesa serie storica di malfunzionamenti reali delle stazioni pluviometriche.

L'applicazione della procedura proposta a futuri eventi permetterà di superare questo limite, e grazie all'individuazione dei malfunzionamenti di misura delle stazioni sarà possibile eseguirne una catalogazione dettagliata e numerosa che potrà portare alla effettiva calibrazione dei parametri di input del metodo.

Come già sottolineato, l'algoritmo *CorkDetective* permette di definire un indice quantitativo sull'affidabilità delle misure di pioggia, decisivo per il monitoraggio in tempo reale della rete pluviometrica esaminata. Oltre a ciò, tale indice di qualità potrà essere utilizzato in successive procedure idrologiche per valutare nel modo più accurato possibile gli afflussi della risorsa più preziosa: l'**Acqua**.

Ringraziamenti

Vorrei innanzitutto ringraziare il Prof. Pierluigi Claps, che ha saputo orientare in modo ottimale il mio lavoro, dispensandomi preziosi consigli.

Inoltre vorrei ringraziare l'Ing. Angelo Forestieri, che mi ha seguito con pazienza giorno dopo giorno nello svolgimento di questa tesi.

Infine vorrei ringraziare Fabio, Federica, Andrea, Martina, Fede, Francesca e tutti gli altri colleghi dell'U.O. Clima Meteo Idro di ARPAL. Sono stati mesi piacevoli, interessanti e di grande arricchimento.

Appendice A

Evoluzione temporale dell'evento del **08.12.2022-09.12.2022**

Di seguito si illustra la sequenza temporale dell'evento di pioggia del 08.12.2022-09.12.2022 analizzata nella sezione 5.1.1.

In particolare si riportano i supporti cartografici che rappresentano l'andamento dell'indice di qualità di ciascuna stazione della rete durante l'evento analizzato, limitandosi per brevità alle sole finestre temporali in cui sono state osservate criticità di misura da parte dell'algoritmo di controllo CorkDetective (esposto in paragrafo 4.2 e seguenti).

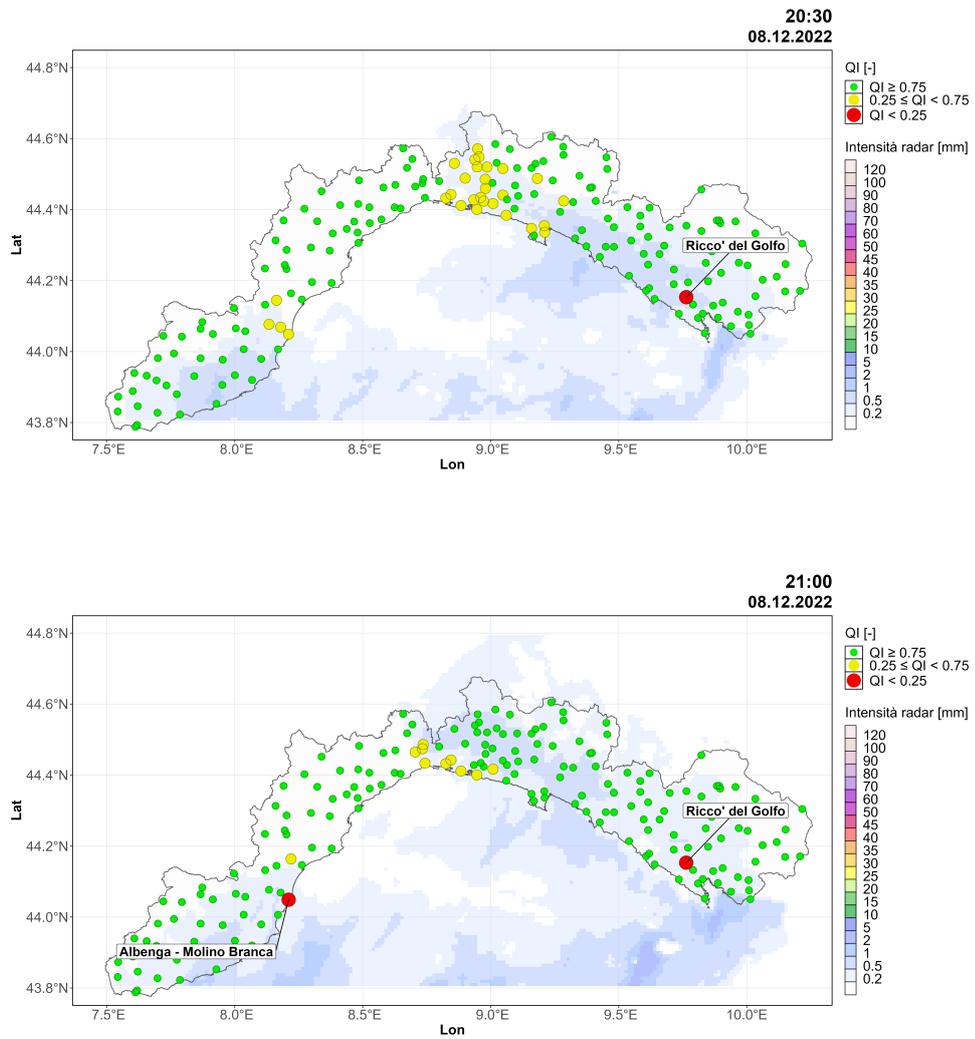


Figura A.1: I risultati di CD per l'08.12.2022 dalle 20:30 alle 21:00

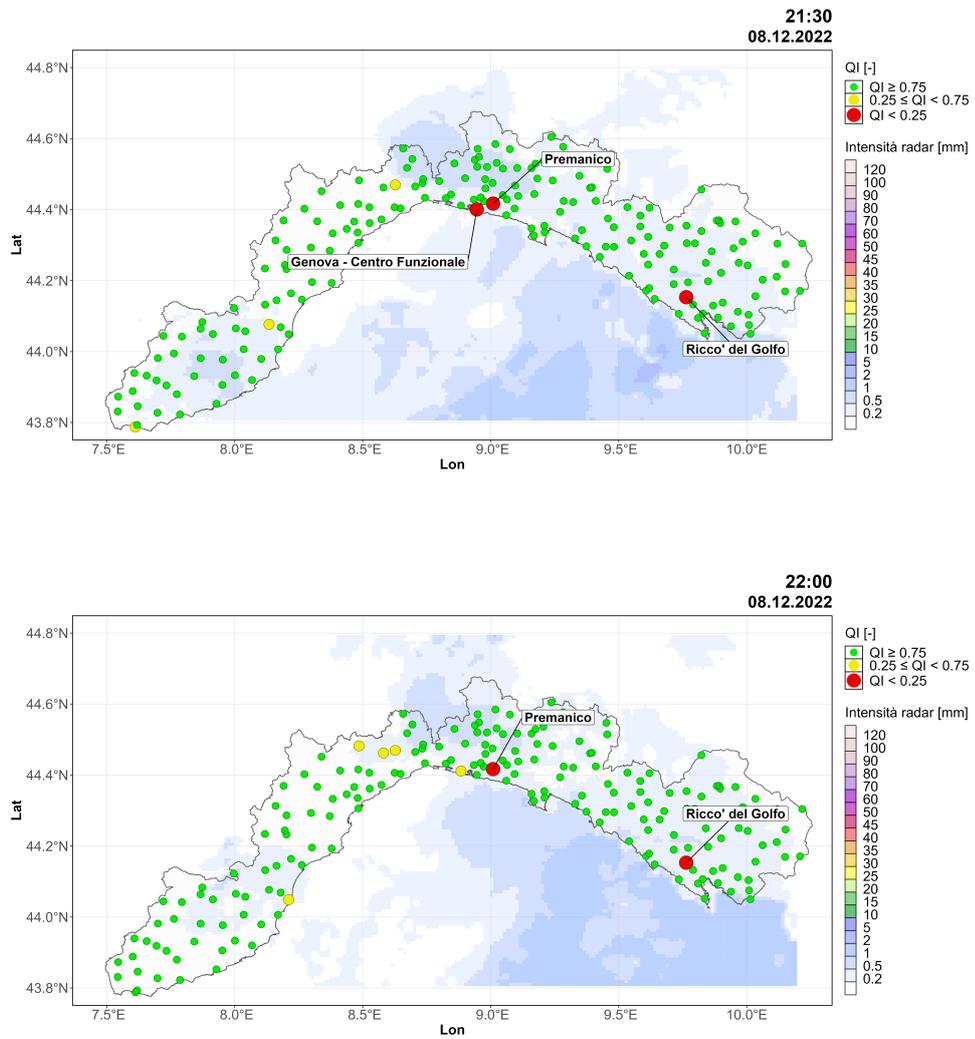


Figura A.2: I risultati di CD per l'08.12.2022 dalle 21:30 alle 22:00

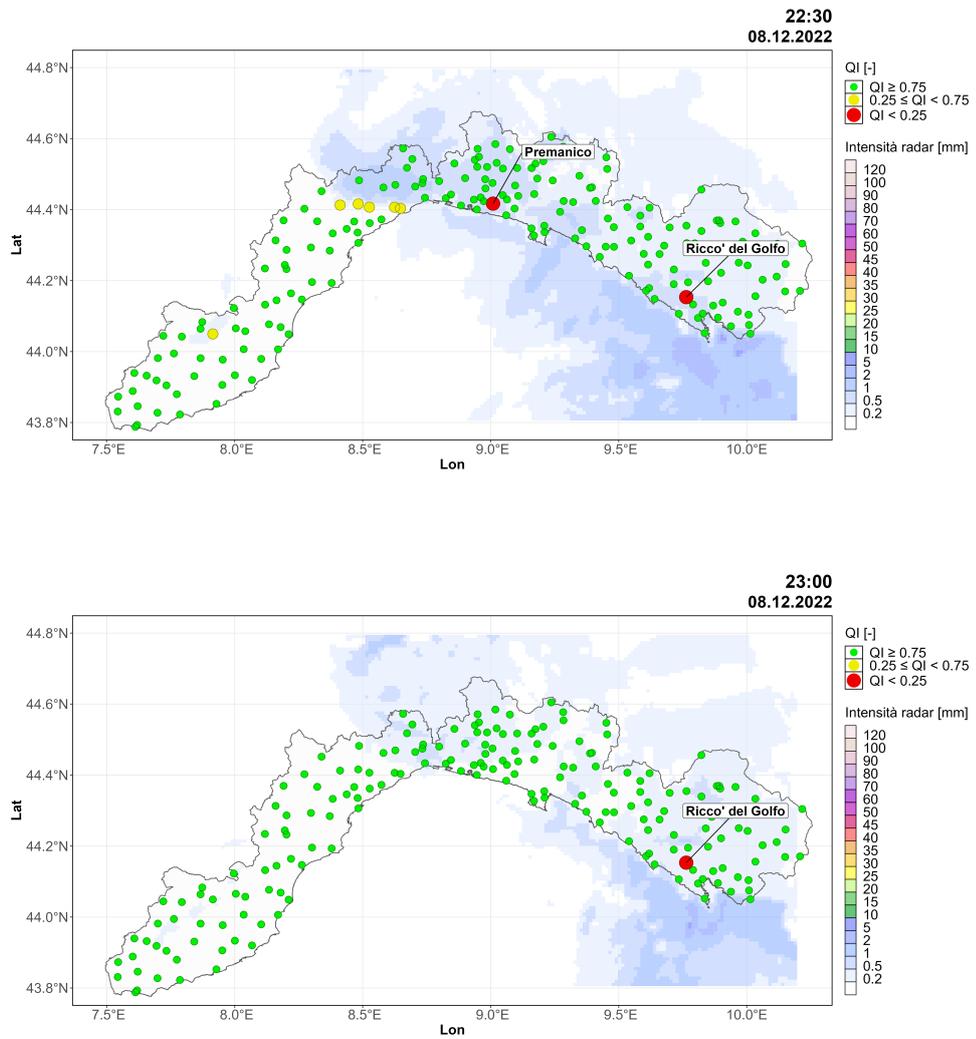


Figura A.3: I risultati di CD per l'08.12.2022 dalle 22:30 alle 23:00

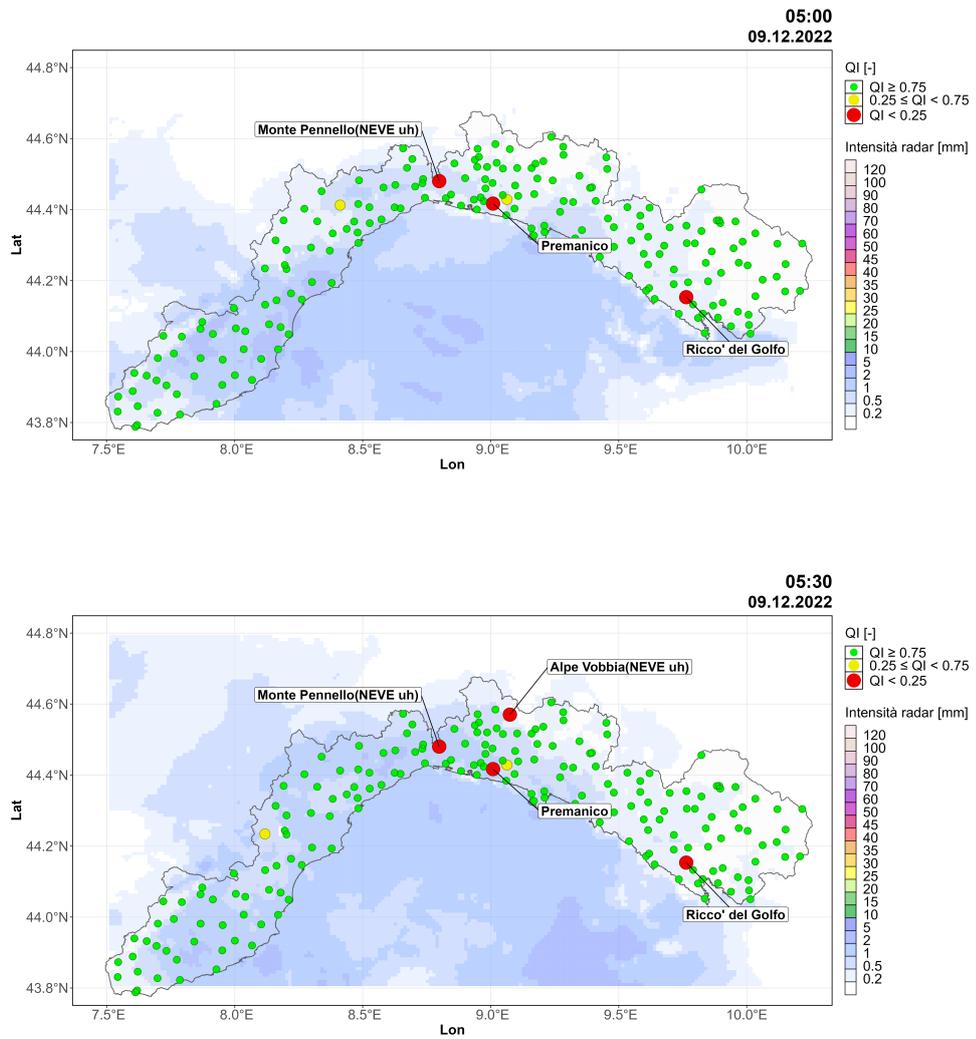


Figura A.4: I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 05:00 alle 05:30

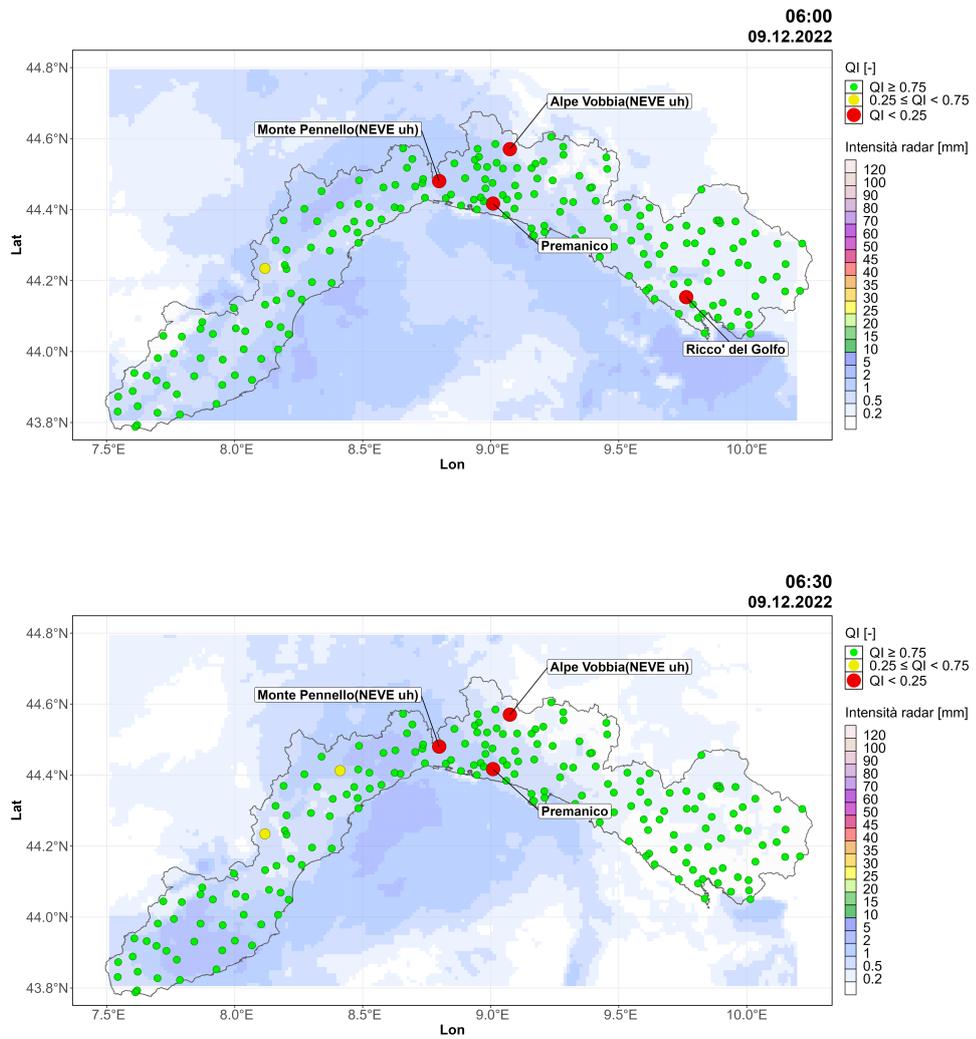


Figura A.5: I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 06:00 alle 06:30

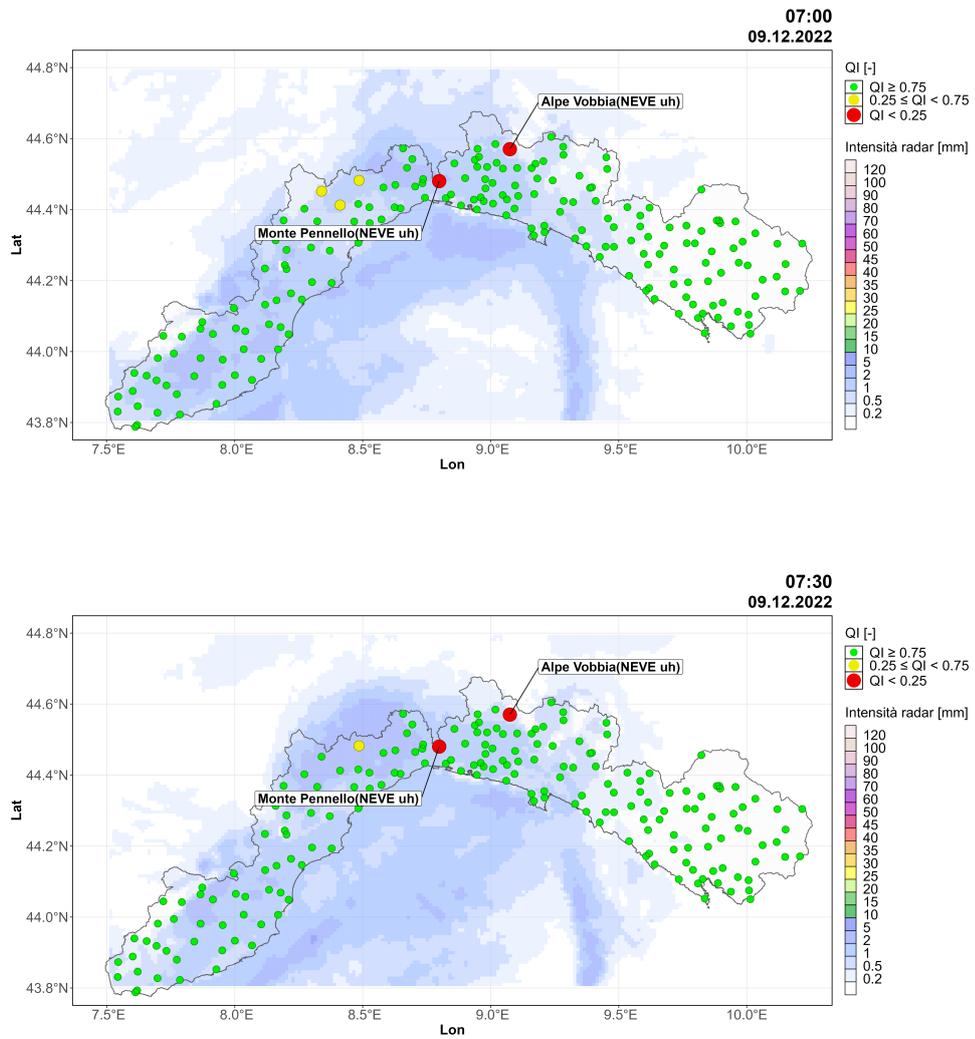


Figura A.6: I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 07:00 alle 07:30

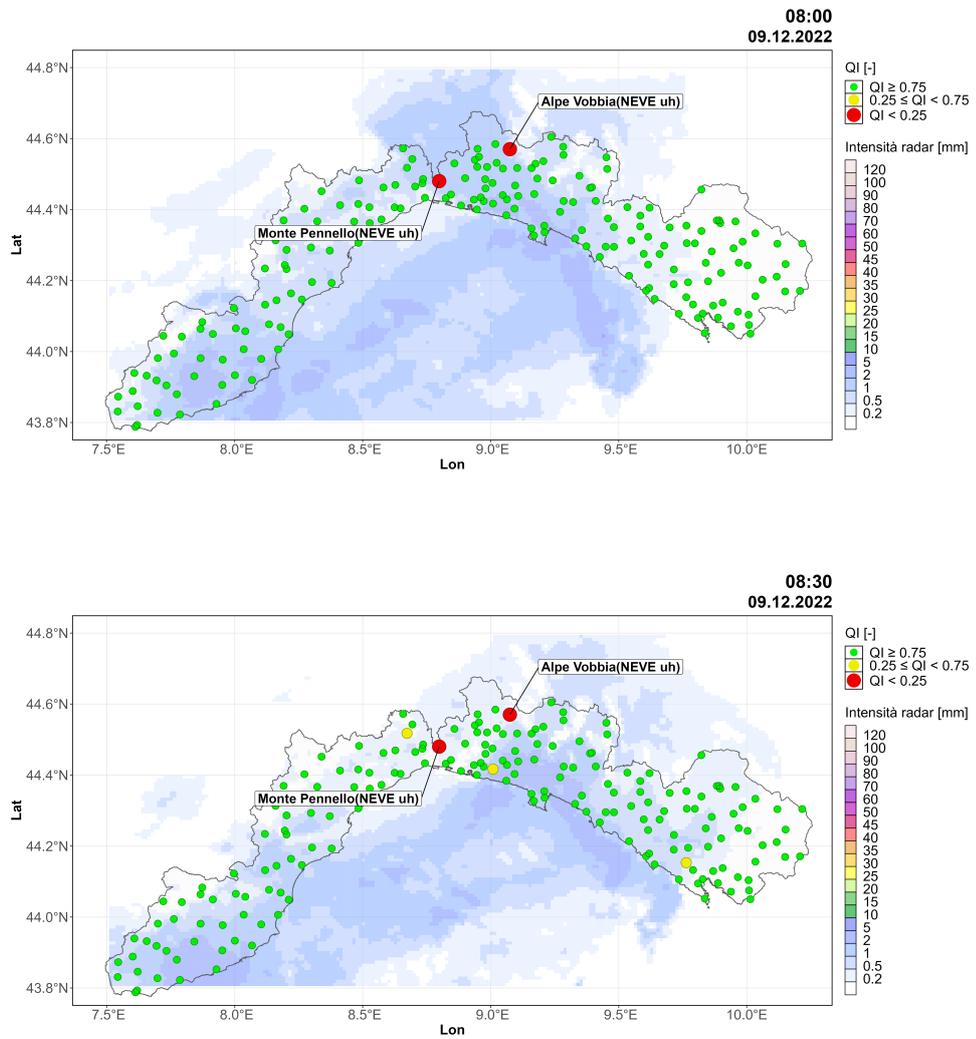


Figura A.7: I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 08:00 alle 08:30

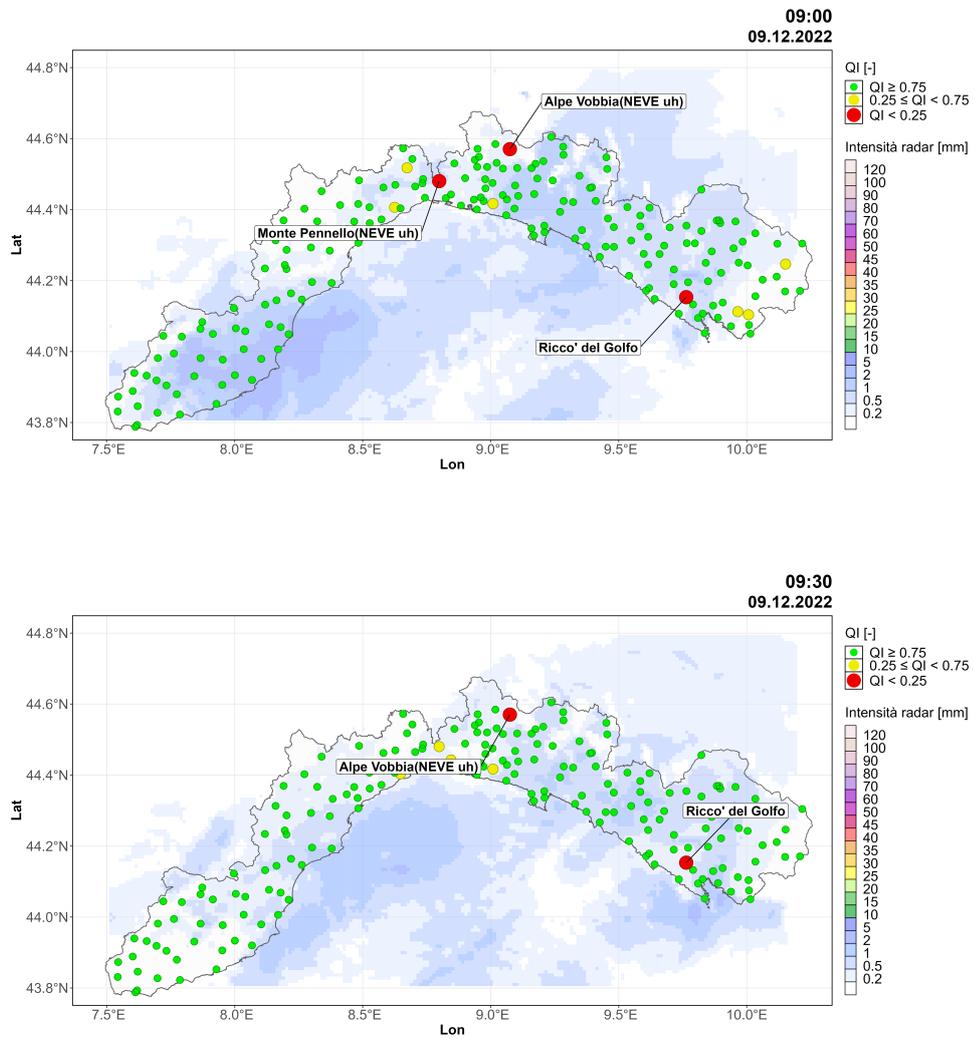


Figura A.8: I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 09:00 alle 09:30

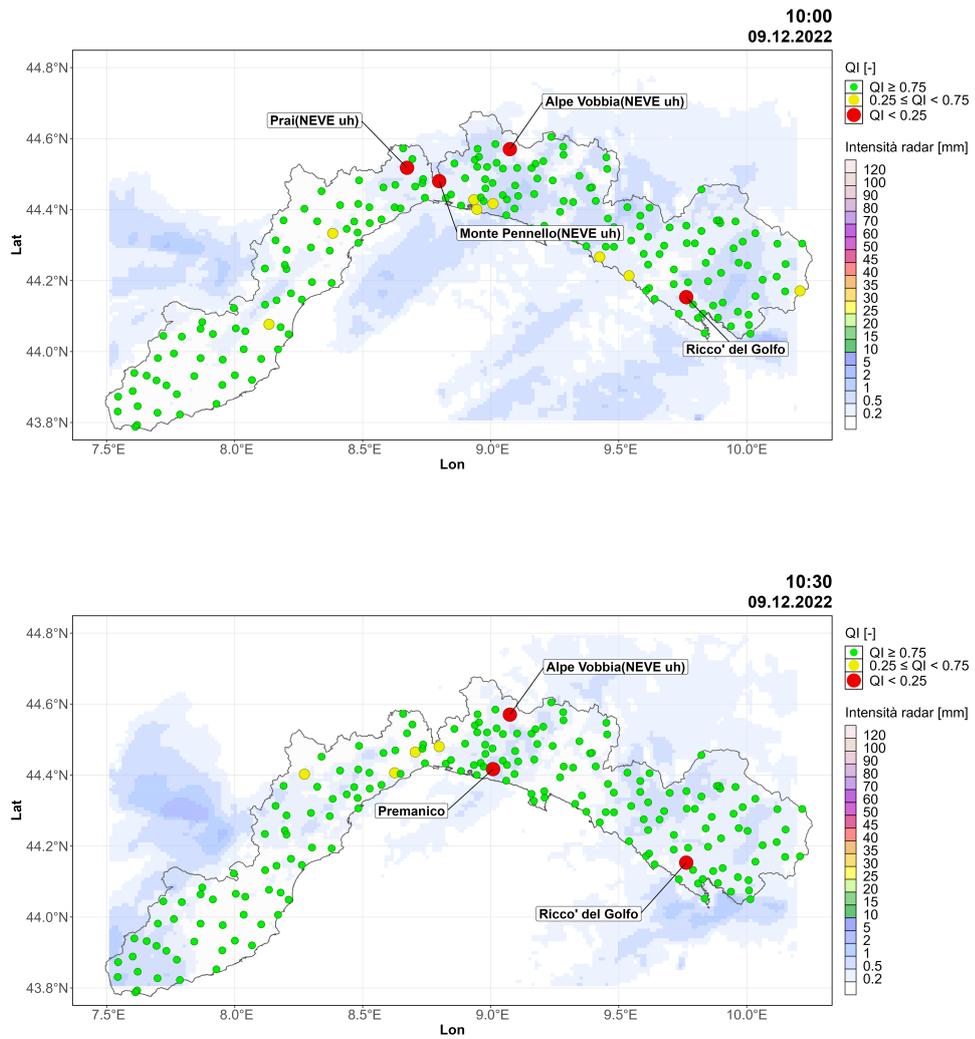


Figura A.9: I risultati di CD per il 09.12.2022 dalle 10:00 alle 10:30

Appendice B

Supporti cartografici

In questa sezione si riportano alcune tavole cartografiche utili alla comprensione della idrografia ligure.

- I bacini idrografici maggiori di 100 km² (figura B.1).
- I bacini idrografici di ponente compresi tra 10 e 100 km² (figura B.2).
- I bacini idrografici di levante compresi tra 10 e 100 km² (figura B.3).

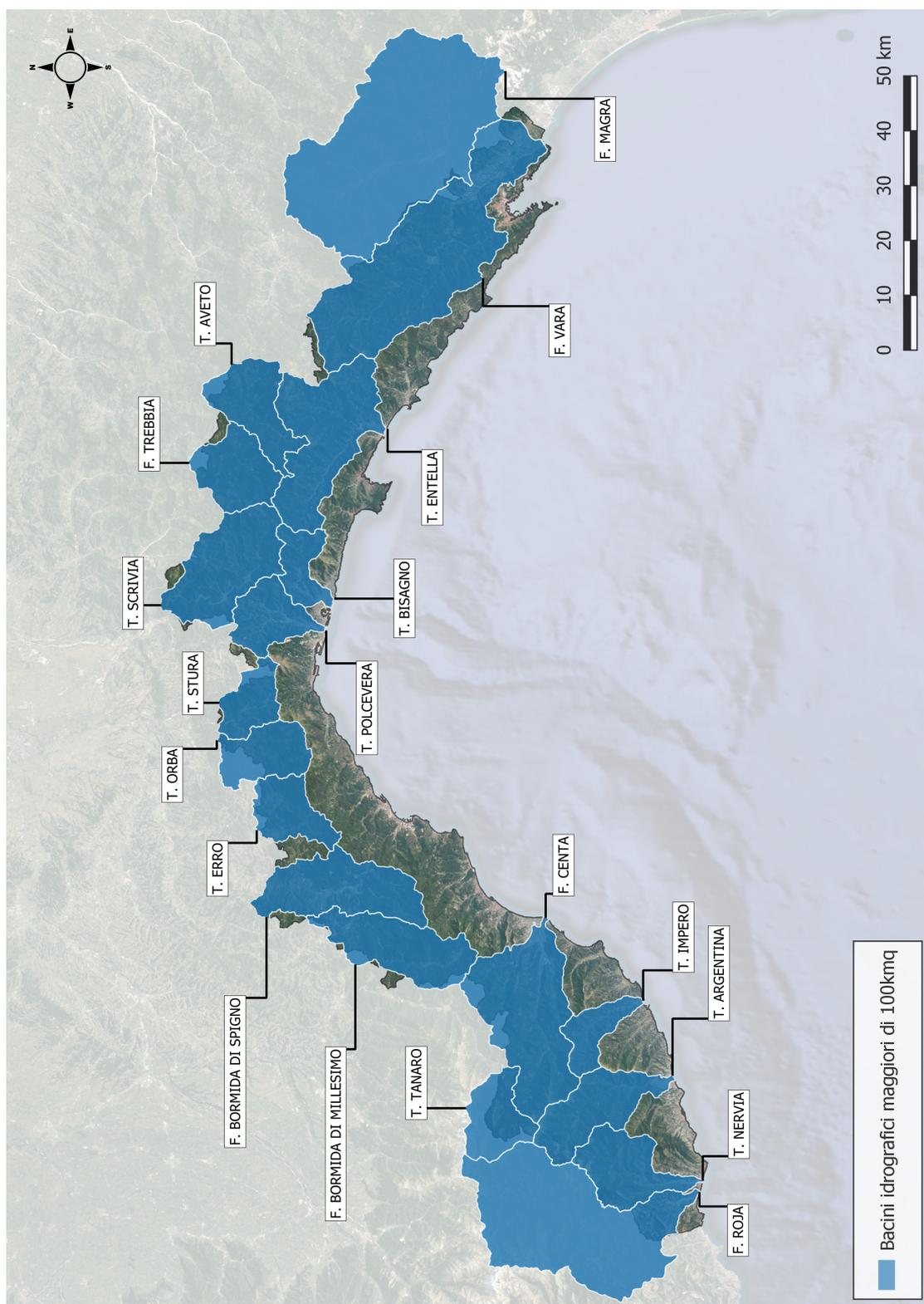


Figura B.1: I bacini idrografici liguri maggiori di 100 km²

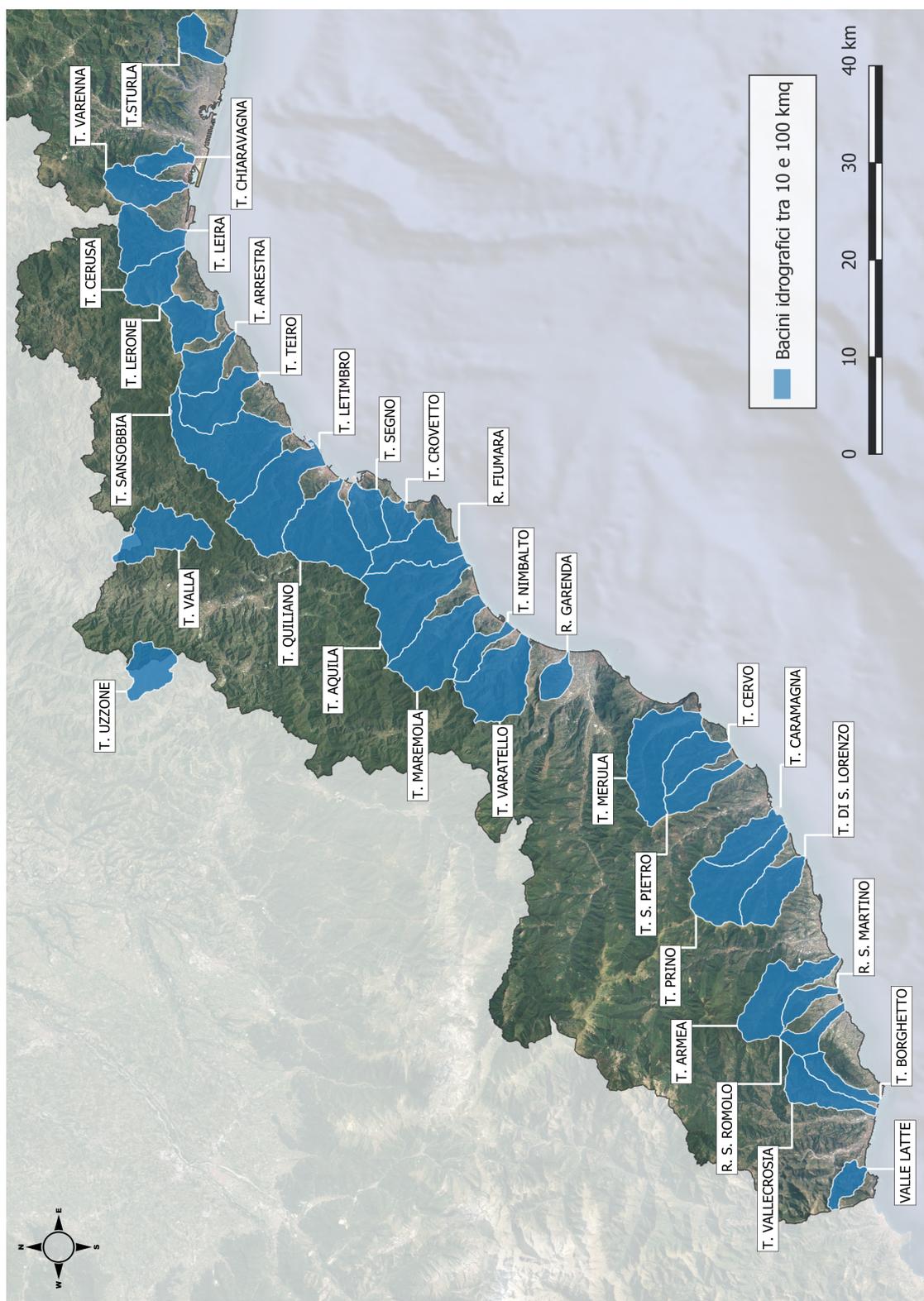


Figura B.2: I bacini idrografici liguri di ponente compresi tra 10 e 100 km²

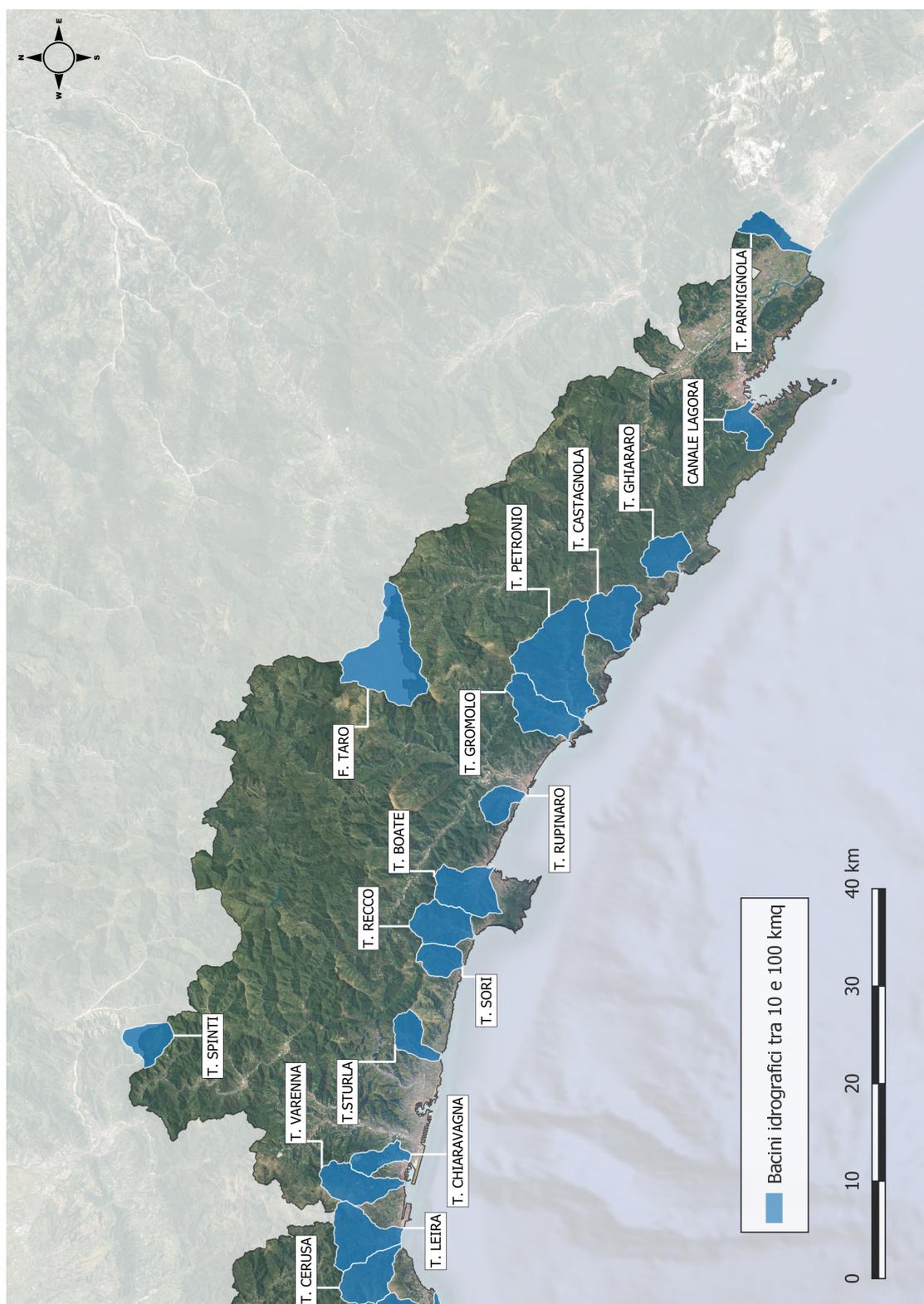


Figura B.3: I bacini idrografici liguri di levante compresi tra 10 e 100 km²

Appendice C

Le tecniche di interpolazione

C.0.1 Metodi deterministici: *IDW*

Tra le tecniche di stima deterministiche di variabili regionalizzate più in uso e di miglior stima [10] vi è l'*Inverse Distance Weighting*. Lo stimatore IDW valuta i valori nei punti non campionati attraverso la media ponderata dei dati osservati nei punti circostanti. In pratica si basa sul concetto secondo il quale il valore sconosciuto di un punto è più influenzato da punti più vicini che da punti più lontani [10]. Quindi essa può essere definita come una funzione inversa della distanza di ciascun punto da quelli vicini [58], ed i ponderatori di stima sono determinati come di seguito C.1.

$$\lambda_i = \frac{1}{|D_i|^d}, d > 0 \quad (\text{C.1})$$

Pertanto, una potenza d minore tende a fornire valori stimati come medie di valori strumentati nelle vicinanze, mentre una potenza d maggiore tende ad attribuire pesi maggiori ai punti più vicini e a ponderare sempre meno i punti più lontani [59].

C.0.2 Metodi geostatistici: *Kriging* e *GRISO*

I metodi geostatistici utilizzano i semi-variogrammi come strumento fondamentale per caratterizzare la dipendenza spaziale delle variabili regionalizzate di interesse [10]. Il semi-variogramma sperimentale è una funzione stimata dai valori campionati del fenomeno ed esprime la variabilità del fenomeno stesso rivelandone il comportamento stocastico [11]. Scelta una direzione principale di calcolo, questo viene stimato con la seguente formulazione C.2.

$$\lambda^*(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_1)]^2 \quad (\text{C.2})$$

E' noto che per valori di $|h|$ sempre crescenti la covarianza ed il coefficiente di correlazione decresceranno, potendosi anche annullare se le coppie di valori risultano indipendenti [60].

Appare pertanto immediato definire il coefficiente di correlazione (o la covarianza) in funzione della distanza $|h|$ e considerare questa curva come una forma quantitativa che esprime, limitatamente alla direzione in esame, la variabilità spaziale di $z(x)$ (immagine a sinistra della C.1).

È anche possibile visualizzare la variabilità spaziale di un parametro regionalizzato attraverso la curva che esprime la varianza degli incrementi in funzione della distanza, dal momento che la dispersione dei valori attorno alla media è misurata dalla varianza (immagine a destra della C.1).

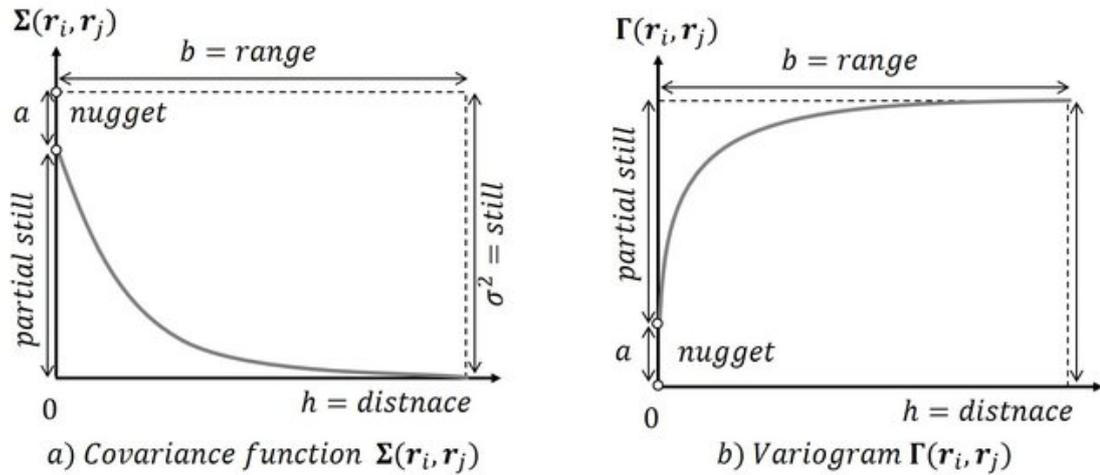


Figura C.1: Il grafico di covarianza ed il variogramma teorico

Una volta stimato il semi-variogramma sperimentale, la letteratura geostatistica propone alcune funzioni matematiche (come il modello sferico, esponenziale, gaussiano, potenza, ecc.) adatte a descrivere il suo comportamento [11]; tramite il *fitting* dei parametri della funzione matematica scelta (solitamente con tecniche ai minimi quadrati) si ottiene il semi-variogramma teorico. L'ottenimento del variogramma teorico è fondamentale per la stima dei ponderatori per il calcolo delle variabili regionalizzate non note.

Kriging Ordinario

Come anticipato, per gli stimatori geostatistici la stima dei ponderatori viene eseguita attraverso la minimizzazione della varianza di stima (come attraverso l'ottimizzazione dei moltiplicatori di Lagrange con le opportune condizioni di vincolo a seconda della tecnica di Kriging scelta).

Considerando il caso di Kriging ordinario, si ottiene quindi un sistema lineare di $n + 1$ equazioni di $n + 1$ incognite che in forma esplicita è il seguente C.3.

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 \gamma_{1,1} + \lambda_2 \gamma_{1,2} + \dots + \lambda_n \gamma_{1,n} + \mu &= \gamma_{1,0} \\
 \lambda_1 \gamma_{2,1} + \lambda_2 \gamma_{2,2} + \dots + \lambda_n \gamma_{2,n} + \mu &= \gamma_{2,0} \\
 \vdots & \\
 \lambda_1 \gamma_{n,1} + \lambda_2 \gamma_{n,2} + \dots + \lambda_n \gamma_{n,n} + \mu &= \gamma_{n,0} \\
 \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n &= 1
 \end{aligned} \tag{C.3}$$

Ed in forma matriciale diventa C.4

$$\begin{bmatrix}
 \gamma_{1,1} & \gamma_{1,2} & \dots & \gamma_{1,n} & 1 \\
 \gamma_{2,1} & \gamma_{2,2} & \dots & \gamma_{2,n} & 1 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \gamma_{n,1} & \gamma_{n,2} & \dots & \gamma_{n,n} & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 0
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix}
 \lambda_1 \\
 \lambda_2 \\
 \vdots \\
 \lambda_n \\
 \mu
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix}
 \gamma_{1,0} \\
 \gamma_{2,0} \\
 \vdots \\
 \gamma_{n,0} \\
 1
 \end{bmatrix} \tag{C.4}$$

Ed infine in forma compatta C.5.

$$\Gamma \times \lambda = G \tag{C.5}$$

Dal momento che per il calcolo delle variabili regionalizzate non note è necessaria la stima dei ponderatori, si possono esplicitare come di seguito C.6.

$$\lambda = G \times \Gamma^{-1} \tag{C.6}$$

GRISO

GRISO (*Rainfall Generator of Spatial Interpolation from Observation*) [12] è un algoritmo di interpolazione geostatistico molto simile al Kriging che permette di definire un campo continuo di una variabile regionalizzata da valori misurati della stessa.

Come nel caso del Kriging, infatti, viene definito un variogramma o un kernel di covarianza dei valori misurati in modo tale da ottenere la correlazione tra i punti [7]. Il campo di una variabile regionalizzata interpolata da GRISO presenta alcune caratteristiche di differenza con il Kriging ordinario [7]:

- I valori della variabile nei punti di misura sono conservati nella mappa interpolata.
- I ponderatori per punti distanti da quelli misurati e quindi a bassa correlazione assumono un valore specifico imposto (μ_V).
- Se sono presenti informazioni sul campo locale di una variabile strumentata, è possibile integrarle nella definizione del kernel di covarianza locale per migliorare la stima.

Queste tre caratteristiche sono ottenibili attraverso la definizione dei parametri del variogramma di stima, ovvero il kernel di covarianza e la lunghezza di correlazione [7].

Affinché queste caratteristiche siano soddisfatte è fondamentale definire alcuni strumenti matematici che rielaborino correttamente le variabili in ingresso, ovvero:

- Il kernel o nucleo di covarianza locale della singola stazione $K(x, y, \lambda)$.
- La lunghezza di correlazione λ .

Il kernel di covarianza è la funzione matematica che permette di definire per ogni punto del dominio considerato il coefficiente di peso di ciascun punto strumentato K_{xy} , mentre la lunghezza di correlazione λ è la distanza oltre la quale l'influenza K_{xy} del punto strumentato in analisi ha influenza nulla sui punti interpolati del campo [11].

Il peso K_{xy} di ciascun punto strumentato risulta in un valore adimensionale compreso tra 0 ed 1, definendo così l'influenza di ciascun punto strumentato sui punti nello spazio fisico circostante, ed è ottenuto tramite la legge matematica del kernel di covarianza $K(x, y, \lambda)$ e dalla lunghezza di correlazione λ [11].

Per soddisfare la prima e la seconda delle tre caratteristiche fondamentali di GRISO ([7]) il coefficiente di peso K_{xy} assume valore unitario in corrispondenza spaziale della variabile strumentata, e valore nullo oltre la lunghezza di correlazione λ .

Quindi, chiamando λ gli estremi del dominio del coefficiente di peso K_{xy} , attraverso il kernel di covarianza $K(x, y, \lambda)$ si definisce la distribuzione spaziale del coefficiente di peso stesso.

Infine, la terza caratteristica fondamentale di GRISO è quella di permettere la scelta per ogni punto strumentato il kernel di covarianza locale più opportuno, andando quindi a individuare la forma funzionale che minimizza lo scarto rispetto all'andamento empirico della covarianza.

A tal fine vengono considerati alcuni possibili kernel di covarianza (forma sferica, circolare, lineare, pentasferica, cubica, esponenziale, *stable*, *whittle*)[7].

Una volta che i parametri di stima del variogramma sono fissati per ciascun punto strumentato è possibile definire il sistema lineare di calcolo dei ponderatori per la misura dei punti non strumentati del campo, attraverso la loro interpolazione.

Come già anticipato, GRISO presenta però alcune differenze rispetto al Kriging ordinario [7]. Innanzitutto, GRISO risolve solamente una volta il sistema lineare definito per ottenere le ponderazioni da utilizzare nell'interpolazione.

In secondo luogo, GRISO permette di utilizzare l'informazione localizzata proveniente da ciascun punto.

Quindi rispetto al sistema lineare di equazioni espresse da C.4 esso presenta nell'ultima riga, al posto di valori unitari, le medie dei pesi prodotti dal kernel di covarianza; mentre l'ultimo elemento della colonna dei termini noti è definito dal valore di tendenza imposto [7].

Perciò il sistema che definisce i ponderatori di interpolazione di GRISO per risolvere la C.6 è il seguente C.7.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} & 1 \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2,n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} & 1 \\ \mu_{K1} & \mu_{K2} & \cdots & \mu_{K1}N & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.7})$$

È possibile così risolvere la 1.2 e definire il campo continuo della variabile regionalizzata in analisi.

Appendice D

La misura radar

La D.1 definisce la potenza ricevuta dalle gocce d'acqua che costituiscono un'idrometeora ad una distanza r [km] dal ricevitore P_r [w] come il prodotto tra una costante dipendente dalle caratteristiche del sistema radar C [-], un coefficiente che dipende dalla costante dielettrica dell'acqua $|K^2|$ [-] (circa pari a 0,93) e dalla riflettività radar Z [$\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$] [15].

$$P_r = C \frac{|K|^2}{r^2} Z \quad (\text{D.1})$$

In particolare, il fattore di riflettività radar Z è definito direttamente dalla distribuzione di forma delle gocce d'acqua che costituiscono le idrometeore nel volume scansionato dal segnale emesso dal radar, di cui di seguito si riporta la relazione formale [15]. In particolare si intende per V il volume di atmosfera scansionato dal radar, e per $N_V(D)dD$ [$\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}$] il numero medio di gocce di pioggia con diametro sferico equivalente compreso tra D e $D + dD$ [mm]. La risoluzione della seguente formulazione integrale D.2 permette di ottenere il volume complessivo di tutte le gocce di pioggia presenti all'interno del volume del fascio radar.

$$Z = \int_0^\infty D^6 N_V(D) dD \quad (\text{D.2})$$

Si può osservare che la riflettività è una grandezza assolutamente indipendente dalle caratteristiche dell'apparecchiatura radar che ha registrato la potenza di eco P_r , dal momento che queste sono interamente racchiuse nel fattore sopracitato C [-]. Nella pratica si fa spesso riferimento ad una scala logaritmica della riflettività, a causa della sua elevata variazione in ordini di grandezza, riportandola correntemente in $dbZ = 10 \log Z$. Dalla sopracitata D.2 è possibile così esprimere la riflettività in funzione della potenza ricevuta dal radar, ottenendo la seguente espressione.D.3

$$Z = \frac{r^2 P_r}{|K|^2 C} \quad (\text{D.3})$$

Questa espressione D.3 è definita in ipotesi ideali di trasmissione e ricezione del sistema, tra cui la perfetta calibrazione radar, l'assenza di *rayleigh scattering* ed assenza di attenuazione del segnale radar [15].

Tuttavia, anche una misura perfetta di Z non implica una stima perfetta del tasso di pioggia R [mm h⁻¹]. Infatti, se trascurati gli effetti causati dal vento e dalla turbolenza, può essere espressa in maniera direttamente proporzionale alla distribuzione della dimensione di gocce di pioggia $N_V(D)$ come di seguito D.4.

$$R = 6\pi \times 10^{-4} \int_0^{\infty} D^3 v(D) N_V(D) dD \quad (\text{D.4})$$

Nell'espressione del tasso di pioggia R è anche presente un termine che tiene in considerazione la relazione tra la velocità di caduta ed il diametro equivalente delle gocce di pioggia $v(D)$, spesso espressa secondo una legge di potenza [15]. Nella pratica è possibile, sulla base di misurazioni dirette della distribuzione di dimensione delle gocce di pioggia al suolo e di alcune assunzioni relative al termine $v(D)$, è possibile ottenere tramite analisi di regressione la relazione che lega riflettività Z ed il tasso di pioggia R D.5.

$$Z = aR^b \quad (\text{D.5})$$

Appendice E

Le specifiche tecniche della rete *OMIRL*

In questa sezione si riportano:

- Le caratteristiche tecniche dei pluviometri della rete *OMIRL* A.9.
- Le specifiche degli apparati radar di Monte Settepani (SV) e di Mont Vial (Nizza-Francia) A.9.
- Gli elenchi delle stazioni pluviometriche e delle stazioni termometriche della rete *OMIRL* A.9.

Tabella E.1: Le specifiche tecniche del pluviometro ETG - 1000cm²

ETG da 1000 cm ²	
Tipologia	Pluviometro a bascula
Bocca di raccolta	1000 cm ²
Range di misura	0-300 mm/h
Risoluzione	0.2 mm
Precisione complessiva	+/- 3%
Collegamento con datalogger	Contatto reed switch

Tabella E.2: Le specifiche tecniche del pluviometro MTX - 1000cm²

MTX da 1000 cm²	
Tipologia	Pluviometro a bascula
Bocca di raccolta	1000 cm ²
Range di misura	0-300 mm/h
Risoluzione	0.2 mm / 0.1 mm opzionale
Precisione complessiva	+ \- 2%
Collegamento con datalogger	Contatto reed

Tabella E.3: Le specifiche tecniche del pluviometro MTX - 400cm²

MTX da 400 cm²	
Tipologia	Pluviometro a bascula
Bocca di raccolta	400 cm ²
Range di misura	0-300 mm/h
Risoluzione	0.2 mm
Collegamento con datalogger	Contatto reed

Tabella E.4: Le specifiche tecniche degli apparati radar di Monte Settepani e Mont Vial

	Monte Settepani (SV)	Mont Vial (Nice - Francia)
Latitudine	44.247°	43.894°
Longitudine	9.199°	7.152°
Quota	1387 m s.l.m.	1525 m s.l.m.
Banda di frequenze	Banda C (5300-5825 MHz)	Banda X (9300-9500MHz)
Raggio d'azione	170 km - 250 km	150 km
Risoluzione spaziale	500 m	500 m
Ampiezza del fascio d'antenna	1°	1.5°
Elevazioni	-0.3°, 0.7°, 2.1°, 4°, 6.4°, 9.7°, 15°, 28.5°	-1°, 0.4°, 1.2°, 2.4°, 4.0°
Risoluzione temporale scansioni	5 min	2.5 - 5 min
Misure in doppia polarizzazione	Sì	Sì
Misure Doppler	Sì	Sì

Tabella E.5: Le stazioni pluviometriche

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Osiglia	8.2025	44.2865	620	Bormida di Millesimo
Mallare	8.2979	44.2932	467	Bormida di Spigno
Passo Della Cisa	9.9284	44.4718	1035	Magra
La Spezia - Fabiano	9.8097	44.0945	57	fra Entella e Magra
Alpe Vobbia	9.0749	44.5703	1082	Scrvia
Pontremoli Depurato- re	9.8831	44.3693	226	Magra
Sassello	8.4857	44.4823	385	Erro
Novegigola	9.8998	44.2218	420	Magra
Genova - Pontedecimo	8.9001	44.4885	75	Polcevera
Brugneto Diga	9.2054	44.5364	777	Trebbia
Equi Terme	10.1499	44.1694	250	Magra
Busalla	8.9489	44.5713	358	Scrvia
Cabanne	9.3465	44.4952	809	Aveto
Alpe Gorreto	9.2363	44.6047	915	Trebbia
Parana	9.8633	44.2822	695	Magra
Mazzola	10.1169	44.2111	460	Magra
Patigno	9.7645	44.3547	744	Magra
Cairo Montenotte	8.2722	44.4023	388	Bormida di Spigno
Calizzano	8.1182	44.2341	647	Bormida di Millesimo
Monte Settepani	8.1958	44.2440	1375	Bormida di Millesimo
Murialdo	8.1598	44.3132	523	Bormida di Millesimo
Piampaludo	8.5809	44.4623	882	Orba
Alpicella	8.5260	44.4067	435	fra Sansobbia e Polce- vera
Sero' di Zignago	9.7370	44.2643	580	Magra
Sella di Gouta	7.6081	43.9396	1212	Nervia
Albenga - Molino Branca	8.2108	44.0488	6	Centa
Lerca	8.6477	44.4035	110	fra Sansobbia e Polce- vera
Fontana Fresca	9.0932	44.4029	791	fra Bisagno ed Entella
Marinella di Sarzana	10.0141	44.0502	2	Magra
Premanico	9.0091	44.4168	234	fra Bisagno ed Entella
La Presa	9.0472	44.4408	150	Bisagno
Creto	9.0071	44.4751	630	Bisagno

–*Continua nella pagina successiva*

Tabella E.5 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Genova - Gavette	8.9611	44.4344	30	Bisagno
Lavagnola	8.4801	44.3354	253	Letimbro
Santuario di Savona	8.4375	44.3456	90	Letimbro
La Spezia	9.8282	44.1070	55	fra Entella e Magra
Conna	8.1036	43.9792	350	fra Impero e Centa
Soliera	10.0621	44.2023	107	Magra
Brugnato	9.7155	44.2313	112	Magra
Bestagno	8.0007	43.9333	281	Impero
Cembrano	9.5841	44.3524	410	Magra
Pontremoli - S.Giustina	9.8967	44.3618	205	Magra
Valleregia	8.9474	44.5204	407	Polcevera
S. Stefano d'Aveto	9.4516	44.5472	1322	Aveto
Comano	10.1196	44.3039	734	Magra
Monterosso	9.6402	44.1483	75	fra Entella e Magra
Villafranca - Fornoli	9.9688	44.2504	156	Magra
Rocca Sigillina	9.9561	44.3667	484	Magra
Bagnone	9.9842	44.3097	320	Magra
Savona - Cima	8.4512	44.3010	20	Quiliano
Rovegno	9.2831	44.5772	650	Trebbia
Rossiglione	8.6578	44.5723	289	Stura
Tendola	10.0338	44.1560	410	Magra
Torriglia	9.1596	44.5169	769	Scrvia
Passo del Cerreto	10.2168	44.3043	1250	Magra
Minucciano	10.2082	44.1710	666	Magra
Montenotte Inferiore	8.4118	44.4126	564	Erro
Barbagelata	9.2420	44.4822	1100	Trebbia
Monte Rocchetta	9.9384	44.0713	405	Magra
Stella S. Giustina	8.4825	44.4158	349	Sansobbia
Testico	8.0352	44.0065	439	fra Impero e Centa
Panesi	9.3562	44.3421	25	Entella
Borgomaro	7.9532	43.9771	250	Impero
Alassio	8.1693	44.0062	25	fra Impero e Centa
Fiorino	8.7049	44.4649	290	fra Sansobbia e Polce- vera
Davagna	9.0954	44.4678	467	Bisagno
Colle Belenda	7.6998	43.9815	1357	Nervia

–Continua nella pagina successiva

Tabella E.5 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Mele	8.7331	44.4742	270	fra Sansobbia e Polcevera
Passo Ghimbegna	7.7333	43.9046	931	fra Nervia e Argentina
Rocchetta Nervina	7.6018	43.8886	215	Nervia
Casoni di Suvero	9.7658	44.3054	1070	Magra
Sesta Godano	9.6775	44.2985	265	Magra
Savona - Istituto Nautico	8.4831	44.3062	24	Letimbro
Genova - Centro Funzionale	8.9459	44.4004	30	Bisagno
Genova - Pegli	8.8246	44.4323	69	fra Sansobbia e Polcevera
Cuccarello	9.6991	44.3497	835	Magra
Piana Battolla - Ponte Reppia	9.8490	44.1980	48	Magra
Poggio Fearza	9.4577	44.3749	530	Entella
Isoverde	8.8582	44.5301	300	Polcevera
Dolcedo	7.9515	43.9059	77	fra Argentina e Impero
Portovenere - Comune	9.8359	44.0520	40	fra Entella e Magra
Ventimiglia	7.6121	43.7878	21	Roya
Taglieto	9.6205	44.4053	895	Magra
Loco Carchelli	9.2842	44.5542	600	Trebbia
Passo del Turchino	8.7360	44.4861	590	fra Sansobbia e Polcevera
Giacopiane - Diga	9.3953	44.4627	1007	Entella
Tavarone	9.5486	44.3127	603	Magra
Genova - Castellaccio	8.9343	44.4280	360	Bisagno
Cavi di Lavagna	9.3735	44.2967	110	fra Entella e Magra
Genova - S.Ilario	9.0607	44.3840	174	fra Bisagno ed Entella
Ranzo	8.0043	44.0654	343	Centa
Levanto - San Gottardo	9.6187	44.1789	85	fra Entella e Magra
Corniolo	9.7348	44.1063	238	fra Entella e Magra
Borgonuovo	7.6210	43.8460	115	Nervia
Castellari	8.2624	44.1467	91	fra Centa e Quiliano
Pornassio	7.8664	44.0639	475	Centa

–Continua nella pagina successiva

Tabella E.5 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Cenesi	8.1342	44.0768	110	Centa
Campo Ligure	8.6939	44.5426	338	Stura
Sciarborasca	8.6246	44.4065	225	fra Sansobbia e Polcevera
Statale	9.4808	44.3505	593	Entella
Scurtabo'	9.5338	44.4068	685	Magra
Carro	9.5977	44.2753	437	Magra
Framura	9.5403	44.2136	421	fra Entella e Magra
Casale di Pignone	9.7150	44.1899	175	Magra
Ricco' del Golfo	9.7637	44.1532	150	Magra
Pian dei Ratti	9.2710	44.3937	70	Entella
Sarzana	9.9655	44.1123	26	Magra
Seborga	7.6985	43.8276	550	fra Nervia e Argentina
Montagna	8.3714	44.2843	253	Quiliano
Cipressa	7.9286	43.8526	285	fra Argentina e Impero
Pizzeglio	7.6945	43.9186	655	Nervia
Prai	8.6731	44.5178	820	Stura
Sella Giassina	9.1821	44.4876	895	Entella
Ognio	9.1699	44.4437	490	Entella
Croce Orero	9.2849	44.4242	640	Entella
Rapallo	9.2093	44.3545	40	fra Bisagno ed Entella
Valzemola	8.1911	44.3696	480	Bormida di Millesimo
Manie	8.3788	44.1933	340	fra Centa e Quiliano
Villafranca Lunigiana	9.9486	44.2911	121	Magra
Pontremoli - La Costa	9.8926	44.3696	340	Magra
Turano	10.1517	44.2464	500	Magra
S. Margherita Vara	9.6596	44.2747	180	Magra
Colle di Cadibona	8.3829	44.3330	385	Quiliano
Sanremo	7.7863	43.8227	61	fra Nervia e Argentina
Montalto Ligure	7.8420	43.9307	240	Argentina
Monte Portofino	9.1691	44.3271	610	fra Bisagno ed Entella
Iera	10.0336	44.3333	538	Magra
Varese Ligure	9.5842	44.3831	345	Magra
Diano Castello - Varcavello	8.0677	43.9199	56	fra Impero e Centa
Castelnuovo Magra	10.0071	44.1038	96	Magra
Luni - Provasco	10.0090	44.0749	5	Magra

–Continua nella pagina successiva

Tabella E.5 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Calice Ligure - Ca Rosse	8.3021	44.1957	50	fra Centa e Quiliano
La Foce - Mte Viseggi	9.7903	44.1325	350	Magra
Onzo - Ponterotto	8.0413	44.0572	115	Centa
Mattarana	9.6147	44.2450	470	Magra
Calice al C. - Molunghi	9.8400	44.2499	425	Magra
Fornola	9.9062	44.1381	25	Magra
Albenga - Isolabella	8.1796	44.0688	36	Centa
Madonna delle Grazie	8.7430	44.4334	104	fra Sansobbia e Polce- vera
Colle di Nava	7.8733	44.0833	927	Centa
Pieve di Teco	7.9147	44.0495	263	Centa
Castelvecchio di R. B.	8.1189	44.1320	432	Centa
Imperia - Oss. Meteosismico	8.0165	43.8796	71	fra Argentina e Impero
Vicomorasso	8.9785	44.4856	310	Polcevera
Borzone	9.4101	44.4243	386	Entella
Colle del Melogno	8.2025	44.2323	1004	fra Centa e Quiliano
Genova - Bolzaneto	8.8956	44.4553	47	Polcevera
Padivarma	9.7710	44.1951	75	Magra
Monte Maure	7.6189	43.7933	210	Roya
Triora	7.7624	43.9945	789	Argentina
Ellera - Foglietto	8.4667	44.3664	80	Sansobbia
Sanda	8.5273	44.3619	180	Sansobbia
Ceriana	7.7739	43.8797	370	fra Nervia e Argentina
Viganego	9.0635	44.4285	430	Bisagno
Crocetta di Orero	8.9859	44.5201	470	Polcevera
Mignanego	8.9382	44.5403	270	Polcevera
La Macchia	9.6148	44.3232	270	Magra
Bargagli	9.1074	44.4385	702	Bisagno
Giacopiane - Lago	9.3877	44.4611	1040	Entella
Cichero	9.3219	44.4211	615	Entella
Santuario Monte Gaz- zo	8.8449	44.4425	310	fra Sansobbia e Polce- vera
Levanto	9.6068	44.1714	6	fra Entella e Magra
S. Margherita Ligure	9.2105	44.3362	20	fra Bisagno ed Entella

–Continua nella pagina successiva

Tabella E.5 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Monte Cappellino	8.9542	44.5486	620	Scrvia
Tassani	9.4493	44.2955	320	fra Entella e Magra
Pigna	7.6561	43.9321	250	Nervia
Bolsine	8.5732	44.3723	26	fra Sansobbia e Polcevera
Colle D'Oggia	7.8667	43.9813	1163	Argentina
Bargone	9.4814	44.2951	260	fra Entella e Magra
Colla Rossa	7.5432	43.8310	460	Roya
Verzi Loano	8.2200	44.1640	450	fra Centa e Quiliano
Verdeggia	7.7211	44.0443	1120	Argentina
Airole	7.5448	43.8730	103	Roya
Urbe - Vara Sup.	8.6274	44.4695	810	Orba
Monte Pennello	8.7987	44.4802	980	fra Sansobbia e Polcevera
Passo del Brattello	9.8229	44.4562	955	Magra
Pietra Piccata	9.8233	44.3396	955	Magra
Bosco di Rossano	9.7975	44.3049	670	Magra
Licciana Nardi	10.0034	44.2427	121	Magra
Alto - Madonna del lago	7.9965	44.1228	1095	Centa
Genova - Geirato	8.9796	44.4597	70	Bisagno
Genova - Quezzi	8.9726	44.4237	200	Bisagno
Monte Beverone	9.8689	44.1295	220	fra Entella e Magra
Camogli	9.1593	44.3470	60	fra Bisagno ed Entella
Chiavari	9.3298	44.3189	50	fra Bisagno ed Entella
Genova - Fiumara	8.8841	44.4114	18	Polcevera
Pitelli	9.8876	44.0956	132	Magra
Montalbano	9.8308	44.1403	330	fra Entella e Magra
Carpe - Case Garoni	8.1634	44.1444	445	fra Centa e Quiliano
Crocefieschi - Santuario	9.0182	44.5846	762	Scrvia
Montoggio	9.0477	44.5156	442	Scrvia
Pratomollo	9.4588	44.4729	1520	Entella
Valbrenna - Gorra	9.0233	44.5318	680	Scrvia
Torriglia - Garaventa	9.1750	44.5293	1032	Trebbia
Amborzasco	9.4550	44.5145	908	Aveto
Deگو - Girini	8.3394	44.4518	450	Bormida di Spigno

–Continua nella pagina successiva

Tabella E.5 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Sestri Levante - PonteSS1	9.4259	44.2667	13	fra Entella e Magra
Fallarosa	9.1034	44.5172	865	Scrvia
Ferrania	8.3225	44.3669	358	Bormida di Spigno

Tabella E.6: Le stazioni termometriche

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Osiglia	8.2025	44.2865	620	Bormida di Millesimo
Mallare	8.2979	44.2932	467	Bormida di Spigno
Alpe Vobbia	9.0749	44.5703	1082	Scrvia
Pontremoli Depuratore	9.8831	44.3693	226	Magra
Sassello	8.4857	44.4823	385	Erro
Novegigola	9.8998	44.2218	420	Magra
Genova - Pontedecimo	8.9001	44.4885	75	Polcevera
Brugneto Diga	9.2054	44.5364	777	Trebbia
Equi Terme	10.1499	44.1694	250	Magra
Busalla	8.9489	44.5713	358	Scrvia
Cabanne	9.3465	44.4952	809	Aveto
Alpe Gorreto	9.2363	44.6047	915	Trebbia
Parana	9.8633	44.2822	695	Magra
Mazzola	10.1169	44.2111	460	Magra
Cairo Montenotte	8.2722	44.4023	388	Bormida di Spigno
Calizzano	8.1182	44.2341	647	Bormida di Millesimo
Monte Settepani	8.1958	44.2440	1375	Bormida di Millesimo
Murialdo	8.1598	44.3132	523	Bormida di Millesimo
Piampaludo	8.5809	44.4623	882	Orba
Alpicella	8.5260	44.4067	435	fra Sansobbia e Polcevera
Sero' di Zignago	9.7370	44.2643	580	Magra
Sella di Gouta	7.6081	43.9396	1212	Nervia
Albenga - Molino Branca	8.2108	44.0488	6	Centa

–Continua nella pagina successiva

Tabella E.6 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Lerca	8.6477	44.4035	110	fra Sansobbia e Polcevera
Fontana Fresca	9.0932	44.4029	791	fra Bisagno ed Entella
Marinella di Sarzana	10.0141	44.0502	2	Magra
Premanico	9.0091	44.4168	234	fra Bisagno ed Entella
Creto	9.0071	44.4751	630	Bisagno
Lavagnola	8.4801	44.3354	253	Letimbro
Santuario di Savona	8.4375	44.3456	90	Letimbro
La Spezia	9.8282	44.1070	55	fra Entella e Magra
Conna	8.1036	43.9792	350	fra Impero e Centa
Bestagno	8.0007	43.9333	281	Impero
Cembrano	9.5841	44.3524	410	Magra
Valleregia	8.9474	44.5204	407	Polcevera
S. Stefano d'Aveto	9.4516	44.5472	1322	Aveto
Comano	10.1196	44.3039	734	Magra
Monterosso	9.6402	44.1483	75	fra Entella e Magra
Villafranca - Fornoli	9.9688	44.2504	156	Magra
Savona - Cima	8.4512	44.3010	20	Quiliano
Rovegno	9.2831	44.5772	650	Trebbia
Rossiglione	8.6578	44.5723	289	Stura
Tendola	10.0338	44.1560	410	Magra
Torriglia	9.1596	44.5169	769	Scrvia
Passo del Cerreto	10.2168	44.3043	1250	Magra
Montenotte Inferiore	8.4118	44.4126	564	Erro
Barbagelata	9.2420	44.4822	1100	Trebbia
Monte Rocchetta	9.9384	44.0713	405	Magra
Stella S. Giustina	8.4825	44.4158	349	Sansobbia
Testico	8.0352	44.0065	439	fra Impero e Centa
Borgomaro	7.9532	43.9771	250	Impero
Alassio	8.1693	44.0062	25	fra Impero e Centa
Fiorino	8.7049	44.4649	290	fra Sansobbia e Polcevera
Davagna	9.0954	44.4678	467	Bisagno
Colle Belenda	7.6998	43.9815	1357	Nervia
Mele	8.7331	44.4742	270	fra Sansobbia e Polcevera
Passo Ghimbegna	7.7333	43.9046	931	fra Nervia e Argentina

–Continua nella pagina successiva

Tabella E.6 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Rocchetta Nervina	7.6018	43.8886	215	Nervia
Casoni di Suvero	9.7658	44.3054	1070	Magra
Sesta Godano	9.6775	44.2985	265	Magra
Savona - Istituto Nautico	8.4831	44.3062	24	Letimbro
Genova - Centro Funzionale	8.9459	44.4004	30	Bisagno
Genova - Pegli	8.8246	44.4323	69	fra Sansobbia e Polce- vera
Cuccarello	9.6991	44.3497	835	Magra
Reppia	9.4577	44.3749	530	Entella
Poggio Fearza	7.7934	44.0420	1845	Centa
Isoverde	8.8582	44.5301	300	Polcevera
Dolcedo	7.9515	43.9059	77	fra Argentina e Impero
Portovenere - Comune	9.8359	44.0520	40	fra Entella e Magra
Ventimiglia	7.6121	43.7878	21	Roya
Taglieto	9.6205	44.4053	895	Magra
Loco Carchelli	9.2842	44.5542	600	Trebbia
Passo del Turchino	8.7360	44.4861	590	fra Sansobbia e Polce- vera
Giacopiane - Diga	9.3953	44.4627	1007	Entella
Tavarone	9.5486	44.3127	603	Magra
Genova - Castellaccio	8.9343	44.4280	360	Bisagno
Cavi di Lavagna	9.3735	44.2967	110	fra Entella e Magra
Genova - S.Ilario	9.0607	44.3840	174	fra Bisagno ed Entella
Ranzo	8.0043	44.0654	343	Centa
Levanto - San Gottardo	9.6187	44.1789	85	fra Entella e Magra
Corniolo	9.7348	44.1063	238	fra Entella e Magra
Borgonuovo	7.6210	43.8460	115	Nervia
Castellari	8.2624	44.1467	91	fra Centa e Quiliano
Pornassio	7.8664	44.0639	475	Centa
Cenesi	8.1342	44.0768	110	Centa
Campo Ligure	8.6939	44.5426	338	Stura
Genova - Centro Fun- zionale sala macchine	8.9459	44.4004	30	NA

–Continua nella pagina successiva

Tabella E.6 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Sciarborasca	8.6246	44.4065	225	fra Sansobbia e Polcevera
Statale	9.4808	44.3505	593	Entella
Scurtabo'	9.5338	44.4068	685	Magra
Carro	9.5977	44.2753	437	Magra
Framura	9.5403	44.2136	421	fra Entella e Magra
Casale di Pignone	9.7150	44.1899	175	Magra
Ricco' del Golfo	9.7637	44.1532	150	Magra
Pian dei Ratti	9.2710	44.3937	70	Entella
Sarzana	9.9655	44.1123	26	Magra
Seborga	7.6985	43.8276	550	fra Nervia e Argentina
Montagna	8.3714	44.2843	253	Quiliano
Cipressa	7.9286	43.8526	285	fra Argentina e Impero
Pizzeglio	7.6945	43.9186	655	Nervia
Prai	8.6731	44.5178	820	Stura
Sella Giassina	9.1821	44.4876	895	Entella
Ognio	9.1699	44.4437	490	Entella
Croce Orero	9.2849	44.4242	640	Entella
Rapallo	9.2093	44.3545	40	fra Bisagno ed Entella
Valzemola	8.1911	44.3696	480	Bormida di Millesimo
Manie	8.3788	44.1933	340	fra Centa e Quiliano
Villafranca Lunigiana	9.9486	44.2911	121	Magra
Pontremoli - La Costa	9.8926	44.3696	340	Magra
Turano	10.1517	44.2464	500	Magra
S. Margherita Vara	9.6596	44.2747	180	Magra
Colle di Cadibona	8.3829	44.3330	385	Quiliano
Sanremo	7.7863	43.8227	61	fra Nervia e Argentina
Monte Portofino	9.1691	44.3271	610	fra Bisagno ed Entella
Iera	10.0336	44.3333	538	Magra
Varese Ligure	9.5842	44.3831	345	Magra
Diano Castello - Varcavello	8.0677	43.9199	56	fra Impero e Centa
Castelnuovo Magra	10.0071	44.1038	96	Magra
Luni - Provasco	10.0090	44.0749	5	Magra
Calice Ligure - Ca Rosse	8.3021	44.1957	50	fra Centa e Quiliano
La Foce - Mte Viseggi	9.7903	44.1325	350	Magra

–Continua nella pagina successiva

Tabella E.6 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Onzo - Ponterotto	8.0413	44.0572	115	Centa
Mattarana	9.6147	44.2450	470	Magra
Calice al C. - Molunghi	9.8400	44.2499	425	Magra
Albenga - Isolabella	8.1796	44.0688	36	Centa
Madonna delle Grazie	8.7430	44.4334	104	fra Sansobbia e Polce- vera
Colle di Nava	7.8733	44.0833	927	Centa
Pieve di Teco	7.9147	44.0495	263	Centa
Castelvecchio di R. B.	8.1189	44.1320	432	Centa
Imperia - Oss. Meteosismico	8.0165	43.8796	71	fra Argentina e Impero
Vicomorasso	8.9785	44.4856	310	Polcevera
Borzone	9.4101	44.4243	386	Entella
Colle del Melogno	8.2025	44.2323	1004	fra Centa e Quiliano
Genova - Bolzaneto	8.8956	44.4553	47	Polcevera
Padivarma	9.7710	44.1951	75	Magra
Monte Maure	7.6189	43.7933	210	Roya
Triora	7.7624	43.9945	789	Argentina
Sestri Levante	9.4099	44.2738	10	fra Entella e Magra
Ellera - Foglietto	8.4667	44.3664	80	Sansobbia
Sanda	8.5273	44.3619	180	Sansobbia
Viganego	9.0635	44.4285	430	Bisagno
Crocetta di Orero	8.9859	44.5201	470	Polcevera
Mignanego	8.9382	44.5403	270	Polcevera
Bargagli	9.1074	44.4385	702	Bisagno
Giacopiane - Lago	9.3877	44.4611	1040	Entella
Cichero	9.3219	44.4211	615	Entella
Santuario Monte Gaz- zo	8.8449	44.4425	310	fra Sansobbia e Polce- vera
Levanto	9.6068	44.1714	6	fra Entella e Magra
S. Margherita Ligure	9.2105	44.3362	20	fra Bisagno ed Entella
Monte Cappellino	8.9542	44.5486	620	Scrvia
Tassani	9.4493	44.2955	320	fra Entella e Magra
Pigna	7.6561	43.9321	250	Nervia
Bolsine	8.5732	44.3723	26	fra Sansobbia e Polce- vera

–Continua nella pagina successiva

Tabella E.6 – Continua dalla pagina precedente

Nome	Lon	Lat	m s.l.m.	Bacino idrografico
Colle D'Oggia	7.8667	43.9813	1163	Argentina
Bargone	9.4814	44.2951	260	fra Entella e Magra
Colla Rossa	7.5432	43.8310	460	Roya
Verzi Loano	8.2200	44.1640	450	fra Centa e Quiliano
Verdeggia	7.7211	44.0443	1120	Argentina
Airole	7.5448	43.8730	103	Roya
Urbe - Vara Sup.	8.6274	44.4695	810	Orba
Monte Pennello	8.7987	44.4802	980	fra Sansobbia e Polcevera
Passo del Brattello	9.8229	44.4562	955	Magra
Pietra Piccata	9.8233	44.3396	955	Magra
Bosco di Rossano	9.7975	44.3049	670	Magra
Licciana Nardi	10.0034	44.2427	121	Magra
Alto - Madonna del lago	7.9965	44.1228	1095	Centa
BOA Capo Mele	8.1770	43.9217	0	NA
Genova - Quezzi	8.9726	44.4237	200	Bisagno
Monte Beverone	9.8689	44.1295	220	fra Entella e Magra
Camogli	9.1593	44.3470	60	fra Bisagno ed Entella
Chiavari	9.3298	44.3189	50	fra Bisagno ed Entella
BOA Meda Portofino	9.1908	44.2958	0	NA
Carpe - Case Garoni	8.1634	44.1444	445	fra Centa e Quiliano
Crocefieschi - Santuario	9.0182	44.5846	762	Scivia
Montoggio	9.0477	44.5156	442	Scivia
Pratomollo	9.4588	44.4729	1520	Entella
Tanadorso	8.9180	44.6195	770	Scivia
Valbrenna - Gorra	9.0233	44.5318	680	Scivia
Torriglia - Garaventa	9.1750	44.5293	1032	Trebbia
Monte di Mezzo	9.4398	44.5598	1250	Aveto
Amborzasco	9.4550	44.5145	908	Aveto
Dego - Girini	8.3394	44.4518	450	Bormida di Spigno
Stella - Burdone	8.5024	44.4061	570	Sansobbia
Fallarosa	9.1034	44.5172	865	Scivia
Ferrania	8.3225	44.3669	358	Bormida di Spigno

Bibliografia

- [1] Donatella Spano et al. *Analisi del Rischio. I cambiamenti climatici in Italia*. oc. Rapp. tecn. Fondazione CMCC - Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, 2020. DOI: 10.25424/CMCC/ANALISI_DEL_RISCHIO. URL: <https://www.cmcc.it/it/analisi-del-rischio-i-cambiamenti-climatici-in-italia> (visitato il 06/03/2023) (cit. a p. 1).
- [2] *Notes and Records of the Royal Society of London on JSTOR*. en. URL: <https://www.jstor.org/journal/noterecoroyasoci?decade=1960> (visitato il 15/02/2023) (cit. a p. 2).
- [3] Irpi. *Polaris*. it-IT. Ott. 2021. URL: <https://polaris.irpi.cnr.it/misurare-la-pioggia/> (visitato il 15/02/2023) (cit. a p. 2).
- [4] World Meteorological Organization, cur. *Guide to the global observing system*. en. 2010 ed. WMO no. 488. Geneva: World Meteorological Organization, 2010. ISBN: 978-92-63-10488-5 (cit. alle pp. 3, 5–10, 20, 21, 51).
- [5] Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera. *MeteoSvizzera*. it. 2023. URL: <https://www.meteosvizzera.admin.ch/> (visitato il 27/02/2023) (cit. a p. 5).
- [6] World Meteorological Organization, cur. *Guide to hydrological practices*. en. 6th ed. WMO no. 168. Geneva, Switzerland: WMO, 2008. ISBN: 978-92-63-10168-6 (cit. alle pp. 5, 7–9, 20, 83).
- [7] Giulia Bruno, Flavio Pignone, Francesco Silvestro, Simone Gabellani, Federico Schiavi, Nicola Rebora, Pietro Giordano e Marco Falzacappa. «Performing Hydrological Monitoring at a National Scale by Exploiting Rain-Gauge and Radar Networks: The Italian Case». en. In: *Atmosphere* 12.6 (giu. 2021), p. 771. ISSN: 2073-4433. DOI: 10.3390/atmos12060771. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/6/771> (visitato il 15/02/2023) (cit. alle pp. 6, 16–19, 34, 83).

- [8] Mattia Stagnaro, Matteo Colli, Luca Giovanni Lanza e Pak Wai Chan. «Performance of post-processing algorithms for rainfall intensity using measurements from tipping-bucket rain gauges». English. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 9.12 (nov. 2016). Publisher: Copernicus GmbH, pp. 5699–5706. ISSN: 1867-1381. DOI: 10.5194/amt-9-5699-2016. URL: <https://amt.copernicus.org/articles/9/5699/2016/> (visitato il 15/02/2023) (cit. a p. 7).
- [9] V. N. Bringi e V. Chandrasekar. *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. ISBN: 978-0-521-62384-1. DOI: 10.1017/CB09780511541094. URL: <https://www.cambridge.org/core/books/polarimetric-doppler-weather-radar/C93A3269D222708EADB81C1E4504BB4F> (visitato il 15/02/2023) (cit. alle pp. 8, 14).
- [10] S. Ly, C. Charles e A. Degré. *Spatial interpolation of daily rainfall at catchment scale: a case study of the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium*. en. preprint. Hydrometeorology/Stochastic approaches, set. 2010. DOI: 10.5194/hessd-7-7383-2010. URL: <https://hess.copernicus.org/preprints/7/7383/2010/hessd-7-7383-2010.pdf> (visitato il 27/02/2023) (cit. alle pp. 10, 15).
- [11] Alessio Pugliese. *Tecniche di interpolazione geostatistica per la stima della piena di progetto in bacini non strumentati*. 2012 (cit. alle pp. 10, 11, 15, 16, 18).
- [12] Flavio Pignone, Nicola Rebora e Cima Foundation. «GRISO: Rainfall Generator of Spatial Interpolation from Observation». en. In: () (cit. alle pp. 11, 17).
- [13] *Il radar meteorologico: come funziona e a cosa serve*. it. URL: <https://www.protezionecivile.gov.it/it/approfondimento/il-radar-meteorologico--come-funziona-e-a-cosa-serve> (visitato il 15/02/2023) (cit. alle pp. 11, 12, 14, 15).
- [14] appenninista. *Monte Settepani dalla Colla Baltera*. it-IT. Giu. 2020. URL: <https://www.appenninista.it/baltera-settepani/> (visitato il 08/03/2023) (cit. a p. 12).
- [15] R. Uijlenhoet. «Raindrop size distributions and radar reflectivity–rain rate relationships for radar hydrology». en. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 5.4 (dic. 2001), pp. 615–628. ISSN: 1607-7938. DOI: 10.5194/hess-5-615-2001. URL: <https://hess.copernicus.org/articles/5/615/2001/> (visitato il 15/02/2023) (cit. alle pp. 12, 13, 20, 21).

- [16] «Radar observation of the atmosphere. L. J. Battan (The University of Chicago Press) 1973. PP X, 324; 125 figures, 21 tables. £7 · 15». en. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 99.422 (1973). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.49709942229>, pp. 793–793. ISSN: 1477-870X. DOI: 10 . 1002 / qj . 49709942229. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49709942229> (visitato il 15/02/2023) (cit. a p. 13).
- [17] Roberta Narcisi. *Ricostruzione delle precipitazioni areali a grande scala mediante radar meteorologici*. it. 2022 (cit. alle pp. 13, 38).
- [18] A. Fornasiero, J. Bech e P. P. Alberoni. «Enhanced radar precipitation estimates using a combined clutter and beam blockage correction technique». it. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6.5 (lug. 2006), pp. 697–710. ISSN: 1684-9981. DOI: 10 . 5194 / nhess - 6 - 697 - 2006. URL: <https://nhess.copernicus.org/articles/6/697/2006/> (visitato il 27/02/2023) (cit. a p. 14).
- [19] Angelo Forestieri. *Il RADAR meteorologico per la stima della precipitazione*. it (cit. alle pp. 14, 16).
- [20] G. Vulpiani. *Comparison of Advanced Radar Polarimetric Techniques for Operational Attenuation Correction at C Band in: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Volume 25 Issue 7 (2008)*. 2008. URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/25/7/2007jtecha936_1.xml?tab_body=fulltext-display (visitato il 27/02/2023) (cit. a p. 15).
- [21] F. Silvestro, N. Rebora, F. Giannoni, A. Cavallo e L. Ferraris. «The flash flood of the Bisagno Creek on 9th October 2014: An “unfortunate” combination of spatial and temporal scales». en. In: *Journal of Hydrology* 541 (ott. 2016), pp. 50–62. ISSN: 00221694. DOI: 10 . 1016 / j . jhydro1 . 2015 . 08 . 004. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169415005636> (visitato il 15/02/2023) (cit. a p. 16).
- [22] Consorzio Lamma. «T2.3.4 Mosaico dei dati radar meteo disponibili sul territorio della Programmazione». it. In: () (cit. alle pp. 17, 38, 74).
- [23] Fabrizio Cuccoli, Luca Facheris, Andrea Antonini, Samantha Melani e Luca Baldini. «Weather Radar and Rain-Gauge Data Fusion for Quantitative Precipitation Estimation: Two Case Studies». en. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 58.9 (set. 2020), pp. 6639–6649. ISSN: 0196-2892, 1558-0644. DOI: 10 . 1109 / TGRS . 2020 . 2978439. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9037189/> (visitato il 15/02/2023) (cit. a p. 18).

- [24] Katarzyna Ośródka, Irena Otop e Jan Szturc. «Automatic quality control of telemetric rain gauge data providing quantitative quality information (RainGaugeQC)». en. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 15.19 (ott. 2022), pp. 5581–5597. ISSN: 1867-8548. DOI: 10.5194/amt-15-5581-2022. URL: <https://amt.copernicus.org/articles/15/5581/2022/> (visitato il 15/02/2023) (cit. alle pp. 20–22, 43, 45, 46, 51, 56).
- [25] Matteo Gentilucci, Maurizio Barbieri, Peter Burt e Fabrizio D’Aprile. «Preliminary Data Validation and Reconstruction of Temperature and Precipitation in Central Italy». en. In: *Geosciences* 8.6 (giu. 2018), p. 202. ISSN: 2076-3263. DOI: 10.3390/geosciences8060202. URL: <http://www.mdpi.com/2076-3263/8/6/202> (visitato il 15/02/2023) (cit. a p. 21).
- [26] Boris Sevruk. «Adjustment of tipping-bucket precipitation gauge measurements». en. In: *Atmospheric Research*. Closing the gap between theory and practice in urban rainfall applications 42.1 (ott. 1996), pp. 237–246. ISSN: 0169-8095. DOI: 10.1016/0169-8095(95)00066-6. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0169809595000666> (visitato il 27/02/2023) (cit. a p. 21).
- [27] Elizabeth Lewis et al. «A rule based quality control method for hourly rainfall data and a 1 km resolution gridded hourly rainfall dataset for Great Britain: CEH-GEAR1hr». en. In: *Journal of Hydrology* 564 (set. 2018), pp. 930–943. ISSN: 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.034. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169418305390> (visitato il 27/02/2023) (cit. a p. 22).
- [28] Line Båserud. «TITAN automatic spatial quality control of meteorological in-situ observations». English. In: *Advances in Science and Research*. Vol. 17. ISSN: 1992-0628. Copernicus GmbH, lug. 2020, pp. 153–163. DOI: 10.5194/asr-17-153-2020. URL: <https://asr.copernicus.org/articles/17/153/2020/> (visitato il 27/02/2023) (cit. a p. 22).
- [29] Daniel B. Michelson. «Systematic correction of precipitation gauge observations using analyzed meteorological variables». en. In: *Journal of Hydrology* 290.3 (mag. 2004), pp. 161–177. ISSN: 0022-1694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.10.005. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169403004190> (visitato il 27/02/2023) (cit. a p. 22).
- [30] Mohammadreza Moslemi e Darko Joksimovic. «Real-Time Quality Control and Infilling of Precipitation Data Using Neural Networks». en. In: pp. 1457–1448. DOI: 10.29007/t5k7. URL: <https://easychair.org/publications/paper/M18T> (visitato il 15/02/2023) (cit. a p. 22).

- [31] Oscar M. Baez-Villanueva et al. «RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements». en. In: *Remote Sensing of Environment* 239 (mar. 2020), p. 111606. ISSN: 00344257. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111606. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425719306261> (visitato il 27/02/2023) (cit. a p. 22).
- [32] Hristos Tyralis, Georgia Papacharalampous e Andreas Langousis. «A Brief Review of Random Forests for Water Scientists and Practitioners and Their Recent History in Water Resources». en. In: *Water* 11.5 (apr. 2019), p. 910. ISSN: 2073-4441. DOI: 10.3390/w11050910. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/5/910> (visitato il 27/02/2023) (cit. alle pp. 22, 83).
- [33] Anna Jurczyk, Jan Szturc e Katarzyna Ośródk. «Quality-based compositing of weather radar derived precipitation». en. In: *Meteorological Applications* 27.1 (2020). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/met.1812>, e1812. ISSN: 1469-8080. DOI: 10.1002/met.1812. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/met.1812> (visitato il 15/02/2023) (cit. a p. 22).
- [34] Alessandro Sacchini. *Full article: Environmental climatic maps of Liguria (Italy)*. 2012. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445647.2012.703901> (visitato il 28/02/2023) (cit. alle pp. 23, 26).
- [35] ARPAL. *Atlante climatico della Liguria*. 2013 (cit. alle pp. 24, 26, 27).
- [36] Mario Bossolasco. «Il «Ciclone di Genova» nel quadro del tempo in grande». it. In: *Geofisica pura e applicata* 11.1 (dic. 1948), pp. 122–126. ISSN: 1420-9136. DOI: 10.1007/BF01980433. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01980433> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 24).
- [37] Isabel Trigo, Trevor Davies e Grant Bigg. «Objective Climatology of Cyclones in the Mediterranean Region». In: *Journal of Climate* 12 (giu. 1999), pp. 1685–1696. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<1685:OCOCIT>2.0.CO;2 (cit. a p. 24).
- [38] Joaquim G. Pinto, Sven Ulbrich, Antonio Parodi, Roberto Rudari, Giorgio Boni e Uwe Ulbrich. «Identification and ranking of extraordinary rainfall events over Northwest Italy: The role of Atlantic moisture». en. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118.5 (2013), pp. 2085–2097. ISSN: 2169-8996. DOI: 10.1002/jgrd.50179. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jgrd.50179> (visitato il 15/02/2023) (cit. alle pp. 24, 25, 27).

- [39] M. Messmer, J. J. Gómez-Navarro e C. C. Raible. «Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe». en. In: *Earth System Dynamics* 6.2 (set. 2015), pp. 541–553. ISSN: 2190-4987. DOI: 10.5194/esd-6-541-2015. URL: <https://esd.copernicus.org/articles/6/541/2015/> (visitato il 15/02/2023) (cit. alle pp. 24, 25).
- [40] Martius. *Episodes of alpine heavy precipitation with an overlying elongated stratospheric intrusion: a climatology - Martius - 2006 - International Journal of Climatology - Wiley Online Library*. 2006. URL: <https://rmets.online.library.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1295> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 25).
- [41] A. Winschall, S. Pfahl, H. Sodemann e H. Wernli. «Impact of North Atlantic evaporation hot spots on southern Alpine heavy precipitation events». en. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 138.666 (2012). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.987>, pp. 1245–1258. ISSN: 1477-870X. DOI: 10.1002/qj.987. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.987> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 25).
- [42] Roberto Mezzalama. *Il clima che cambia l'Italia*. it-IT. Giulio Einaudi Editore, 2021. URL: <https://www.einaudi.it/catalogo-libri/problemi-contemporanei/il-clima-che-cambia-litalia-roberto-mezzalama-9788806247362/> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 26).
- [43] Nicola Reborà. *Extreme Rainfall in the Mediterranean: What Can We Learn from Observations? in: Journal of Hydrometeorology Volume 14 Issue 3 (2013)*. 2013. URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/14/3/jhm-d-12-083_1.xml?tab_body=abstract-display (visitato il 28/02/2023) (cit. alle pp. 26, 27, 34).
- [44] Gerardo Brancucci. *Caratterizzazione geomorfica dei principali bacini idrografici della Liguria Marittima - Risultati preliminari*. 2005. URL: <https://iris.unige.it/handle/11567/212574> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 27).
- [45] ARPAL. *AllertaLiguria - Divisione del territorio*. URL: https://allertaliguria.regione.liguria.it/divisione_territorio.php (visitato il 28/02/2023) (cit. alle pp. 28–31, 35).
- [46] ARPAL. *Omirl Online*. URL: <https://omirl.regione.liguria.it/#/map> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 32).
- [47] ETG. «ETG R_102 - Pluviometro 1000» (cit. a p. 35).
- [48] MTX. «FAK001AC - Pluviometro 400» (cit. a p. 36).
- [49] MTX. «FAK010AA - Pluviometro 1000» (cit. a p. 36).

- [50] Dipartimento di Protezione Civile. *Rischio meteo-idro: il mosaico nazionale dei prodotti radar*. it. URL: <https://www.protezionecivile.gov.it/it/approfondimento/rischio-meteo-idro--il-mosaico-nazionale-dei-prodotti-radar> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 38).
- [51] Steinacker. *Data Quality Control Based on Self-Consistency in: Monthly Weather Review Volume 139 Issue 12 (2011)*. 2011. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/139/12/mwr-d-10-05024.1.xml> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 44).
- [52] Ewa Burszta-Adamiak, Paweł Licznar e Janusz Zaleski. «Criteria for identifying maximum rainfall determined by the peaks-over-threshold (POT) method under the Polish Atlas of Rainfall Intensities (PANDa) project». Inglese. In: *Meteorology Hydrology and Water Management* 7.1 (gen. 2019). Publisher: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, pp. 3–13. ISSN: 2299-3835, 2353-5652. DOI: 10.26491/mhwm/93595. URL: <http://www.mhwm.pl/Criteria-for-identifying-maximum-rainfall-determined-by-the-peaks-over-threshold,93595,0,2.html> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 44).
- [53] J. R. Taylor e H. L. Loescher. «Automated quality control methods for sensor data: a novel observatory approach». English. In: *Biogeosciences* 10.7 (lug. 2013). Publisher: Copernicus GmbH, pp. 4957–4971. ISSN: 1726-4170. DOI: 10.5194/bg-10-4957-2013. URL: <https://bg.copernicus.org/articles/10/4957/2013/> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 45).
- [54] Christopher A. Fiebrich, Cynthia R. Morgan, Alexandria G. McCombs, Peter K. Hall e Renee A. McPherson. «Quality Assurance Procedures for Mesoscale Meteorological Data». EN. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 27.10 (ott. 2010). Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, pp. 1565–1582. ISSN: 0739-0572, 1520-0426. DOI: 10.1175/2010JTECHA1433.1. URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/27/10/2010jtecha1433_1.xml (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 45).
- [55] Katarzyna Ośródka e Jan Szturc. «Improvement in algorithms for quality control of weather radar data (RADVOL-QC system)». English. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 15.2 (gen. 2022). Publisher: Copernicus GmbH, pp. 261–277. ISSN: 1867-1381. DOI: 10.5194/amt-15-261-2022. URL: <https://amt.copernicus.org/articles/15/261/2022/> (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 45).
- [56] World Meteorological Organization (WMO) e World Meteorological Organization (WMO). *Guide on the Global Data-processing System (GDPS)*. WMO. Geneva: WMO, 1993. ISBN: 978-92-63-13305-2 (cit. a p. 46).

- [57] Kondragunta. *P2.4 Automated real-time operational rain gauge quality control tools in NWS hydrologic operations (2006 - Annual2006_20hydrology)*. 2006. URL: https://ams.confex.com/ams/Annual2006/techprogram/paper_102834.htm (visitato il 28/02/2023) (cit. a p. 46).
- [58] Ramesh S. V. Teegavarapu e V. Chandramouli. «Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records». en. In: *Journal of Hydrology* 312.1 (ott. 2005), pp. 191–206. ISSN: 0022-1694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.015. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169405000880> (visitato il 05/03/2023) (cit. a p. 15).
- [59] George Y. Lu e David W. Wong. «An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique». en. In: *Computers & Geosciences* 34.9 (set. 2008), pp. 1044–1055. ISSN: 0098-3004. DOI: 10.1016/j.cageo.2007.07.010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300408000721> (visitato il 05/03/2023) (cit. a p. 15).
- [60] G Raspa. «Dispense di Geostatistica Applicata». it. In: () (cit. a p. 16).