

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**Politecnico
di Torino**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Ricostruzione delle piogge estreme
giornaliere sul bacino del Po ed analisi
dell'Hershfield factor**

Relatore

Ch.mo Prof. Pierluigi Claps

Correlatore

Ing. Paola Mazzoglio

Candidata

Paola Cicchini

Anno Accademico 2020/2021

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Ricostruzione delle piogge estreme
giornaliere sul bacino del Po ed analisi
dell'Hershfield factor**

Relatore

Ch.mo Prof. Pierluigi Claps

Correlatore

Ing. Paola Mazzoglio

Candidata

Paola Cicchini

Matricola 262108

Anno Accademico 2020/21

RIASSUNTO

L'instabilità climatica riguarda i valori medi delle variabili climatiche, le loro distribuzioni statistiche e i valori estremi. La comprensione degli estremi climatici e delle loro variazioni riveste particolare importanza nella valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici e nella definizione delle strategie di adattamento. Gli eventi climatici estremi possono concorrere a generare gravi conseguenze su territorio, salute della popolazione, attività economiche, ambiente e società.

Si rende, pertanto, opportuno attuare misure di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici, evidenziando l'importanza delle attività di previsione e prevenzione del rischio idrogeologico, analizzando minuziosamente le informazioni sulle precipitazioni.

In questo lavoro di tesi si è scelto di esaminare gli estremi pluviometrici, elaborando le altezze giornaliere di precipitazione, acquisite da una rete di stazioni caratterizzata da una densità significativamente maggiore di quella che si occupa della misura degli estremi sub-giornalieri, per ricavare le altezze di precipitazione giornaliera massime annue e confrontarle con quelle sub-giornaliere. Si è inoltre realizzato un database delle precipitazioni giornaliere, validato con controlli di qualità e mediante il calcolo delle statistiche descrittive, per poterlo affiancare al database esistente riguardante le precipitazioni sub-giornaliere (I²-RED, Improved Italian – Rainfall Extreme Dataset).

La finalità di questo studio è indagare la possibilità di utilizzare l'informazione dei dati giornalieri per rendere più densi i valori degli estremi annui dell'intero bacino del fiume Po, ricavando corrispondenze tra i dati giornalieri e gli estremi relativi a 24 ore consecutive tramite il fattore H di Hershfield: nota la stima del fattore H per le stazioni dove sono disponibili sia i dati giornalieri sia i dati sub-giornalieri, tramite interpolazione spaziale dello stesso H, è possibile estendere l'informazione alle stazioni prive del dato sub-giornaliero.

ABSTRACT

Climate instability concerns the average values of climatic variables, their statistical distributions and extreme values. Understanding climatic extremes and their variations is of particular importance in assessing the impacts of climate change and in defining adaptation strategies. Extreme climatic events can contribute to generate serious consequences on the territory, on the health of the population, on economic activities, on the environment and on society.

It is therefore advisable to implement mitigation and adaptation measures to climate change, highlighting the importance of the forecasting and prevention of hydrogeological risk, carefully analyzing the information on rainfall.

In this work it was decided to examine the daily rainfall, because they have a greater density of stations, to obtain the maximum annual rainfall and compare them with the sub-daily ones which are characterized by fewer and shorter series compared to the sub-daily ones. A database of daily rainfall has been created, validated with quality controls and by calculating descriptive statistics, in order to be able to combine it with the existing database on sub-daily rainfall (I²-RED, Improved Italian – Rainfall Extreme Dataset).

The purpose of this study is to investigate the possibility of using the information of daily data to make the sub-daily values of the entire Po river basin more reliable, obtaining correspondences between the daily and sub-daily data through the Hershfield H factor: knowing the estimate of the H factor for stations where both daily data and sub-daily data are available, through spatial interpolation of the same H, it is possible to extend the information to stations lacking in sub-daily data.

SOMMARIO

RIASSUNTO.....	I
ABSTRACT	II
INDICE DELLE FIGURE.....	VI
INDICE DELLE TABELLE	X
1. INTRODUZIONE	1
1.1 IL RUOLO DEGLI EVENTI ESTREMI E L'IMPATTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO.....	1
1.2 OBIETTIVI E STRUTTURA DELLA TESI.....	1
2. BACINO DEL PO.....	3
2.1 STRUMENTI OPERATIVI A LIVELLO DI DISTRETTO DEL PO.....	6
2.2 RETE DI MISURA DELLE PRECIPITAZIONI.....	7
3. MISURA, ARCHIVIAZIONE E GESTIONE DEI DATI PLUVIOMETRICI.....	9
3.1 CARATTERISTICHE DEI PLUVIOMETRI	9
3.2 CLASSIFICAZIONE DEI PLUVIOMETRI.....	12
3.3 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA RILEVAZIONE	15
3.4 SERVIZIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO NAZIONALE	16
4. BANCHE DATI DELLE PRECIPITAZIONI INTENSE.....	17
4.1 ARPA PIEMONTE.....	17
4.2 VAPI.....	18
4.3 SCIA	18
4.4 OMIRL.....	20
4.5 ATLANTE CLIMATICO DELLA LIGURIA	21
5. ELABORAZIONI PRELIMINARI.....	22
5.1 COSTRUZIONE DELL'ANAGRAFICA STAZIONI	22
5.2 PROCESSAMENTO DATI	24

5.3	QUALITY CONTROL DEI DATI.....	26
6.	CARATTERIZZAZIONE SPAZIO - TEMPORALE DELLE MODALITA' DI MISURA.....	29
6.1	GEOLocalizzazione DELLE STAZIONI NEL BACINO DEL PO.....	29
6.2	STRUTTURA DEL DATABASE.....	34
6.3	CARATTERISTICHE DEL DATABASE.....	38
6.3.1	EVOLUZIONE TEMPORALE DELLE STAZIONI PLUVIOMETRICHE.....	41
6.3.2	CONFRONTO TRA DATABASE Giornaliere E DATABASE I ² -RED	43
7.	STATISTICHE DESCRITTIVE DEI MASSIMI ANNUI DI PIOGGIA GIORNALIERA.....	45
7.1	CALCOLO DEL MASSIMO ANNUO DI PRECIPITAZIONE	45
7.2	STATISTICHE DESCRITTIVE E CONTROLLO QUALITA'	49
7.2.1	MOMENTI ORDINARI	49
7.2.2	MOMENTI ORDINARI ADIMENSIONALI	50
7.2.3	MOMENTI PESATI IN PROBABILITA'	50
7.2.4	L-MOMENTI E L-MOMENTI ADIMENSIONALI.....	51
7.3	CALCOLO DELLE STATISTICHE DESCRITTIVE.....	53
7.4	INTERPOLAZIONE SPAZIALE DELLE STATISTICHE DESCRITTIVE.	62
8.	RELAZIONE DI HERSHFIELD TRA MASSIMI A DIVERSO INTERVALLO DI MISURA	66
8.1	ANALISI DELLA LETTERATURA.....	66
8.2	ANALISI DI CONGRUENZA DEI DATI	71
8.2.1	CONFRONTO TRA MASSIMI ANNUI GIORNALIERI E DI 24 ORE	72
8.3	CALCOLO DEL FATTORE DI HERSHFIELD	83
8.4	OSSERVAZIONI SU MEDIA E COEFFICIENTE DI VARIAZIONE DEL FATTORE DI HERSHFIELD.....	88
9.	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	92

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	94
RINGRAZIAMENTI	99

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1 - Territori compresi nel bacino del Po	3
Figura 2.2 - Principali unità idrogeologiche del bacino del Po	4
Figura 2.3 - Distribuzione della densità demografica nel bacino del Po	5
Figura 2.4 - Uso reale del suolo.....	6
Figura 2.5 - Posizione geografica delle stazioni pluviometriche nel 2020.....	7
Figura 3.1 - Pluviometro.....	10
Figura 3.2 - Deformazione del flusso dell'acqua a causa del vento	11
Figura 3.3 - Pluviografo	12
Figura 3.4 - Tipico registratore meccanico con rotoli di carta	12
Figura 3.5 - Pluviometro a peso	13
Figura 3.6 - Pluviometro galleggiante	13
Figura 3.7 - Interno del pluviometro a bascula.....	14
Figura 3.8 - Disdrometro	14
Figura 3.9 - Pluviometro con data logger digitale	15
Figura 4.1 - Stazioni di precipitazione cumulata SCIA.....	20
Figura 4.2 - Geolocalizzazione delle stazioni di ATLANTE	21
Figura 5.1 - Esempio geolocalizzazione stazione su Google Earth.....	24
Figura 5.2 - Serie storica di Lavagnina Centrale (AL)	26
Figura 5.3 - Serie storica di Ceresole Reale (TO)	27
Figura 5.4 - Serie storica di Ceresole Reale (TO) modificata	27
Figura 5.5 - Dato grezzo SCIA, dato grezzo OMIRL e dato finale sostituito della stazione 8027 "Brugnato"	28
Figura 6.1 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Italia	29
Figura 6.2 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche del bacino del Po.....	29
Figura 6.3 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Piemonte	31
Figura 6.4 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Valle d'Aosta.....	32
Figura 6.5 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Liguria.....	32

Figura 6.6 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Lombardia.....	33
Figura 6.7 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Emilia-Romagna	33
Figura 6.8 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Veneto, Marche, Toscana e Prov. Trento.....	34
Figura 6.9 - Primi valori del database delle misure di precipitazioni giornaliere	35
Figura 6.10 - Primi valori del database delle coordinate X e Y	36
Figura 6.11 - Primi valori dell’anagrafica del database.....	37
Figura 6.12 - Distribuzione spaziale delle stazioni pluviometriche del database.....	38
Figura 6.13 - Distribuzione spaziale delle serie temporali dei pluviometri. Il colore si riferisce alla lunghezza delle serie storiche.	39
Figura 6.14 - Distribuzione spaziale delle serie temporali dei pluviometri non inclusi nel database “I ² -RED”. Il colore si riferisce alla lunghezza delle serie storiche.....	40
Figura 6.15 - Distribuzione di frequenza delle quote delle stazioni pluviometriche.....	40
Figura 6.16 - Distribuzione spaziale delle quote delle stazioni pluviometriche.....	41
Figura 6.17 - Variazione spaziale e temporale del numero di stazioni pluviometriche nel bacino del Po	42
Figura 6.18 - Confronto del numero di stazioni dei due database anno per anno	43
Figura 6.19 - Confronto del numero di stazioni dei due database anno per anno per regione	44
Figura 7.1 - Valori del database delle misure di massimi annui di precipitazione.....	45
Figura 7.2 - Prime stazioni pluviometriche ‘incomplete’ nella Command Window di Matlab.....	47
Figura 7.3 - Serie annuali attendibili/non attendibili nella Command Window di Matlab	47
Figura 7.4 - Valori del database delle misure di massimi annui di precipitazione.....	48
Figura 7.5 - Distribuzione spaziale della deviazione standard del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione	53
Figura 7.6 - Schema dei dati analizzati delle stazioni con valori anomali	54
Figura 7.7 - Grafico della serie storica della stazione 9301	55
Figura 7.8 – Valore massimo a 24 h della stazione 9301 in I ² -RED.....	55
Figura 7.9 - Grafico della serie storica della stazione 9067	55
Figura 7.10 - Valore massimo a 24 h della stazione 21123 in I ² -RED	56
Figura 7.11 - Sostituzione manuale con ‘NaN’ per il valore errato	56

Figura 7.12 - Distribuzione spaziale della deviazione standard del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche	56
Figura 7.13 - Distribuzione spaziale della media del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione prima delle modifiche.....	57
Figura 7.14 - Distribuzione spaziale della media del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche	57
Figura 7.15 - Distribuzione spaziale della mediana del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione prima delle modifiche.....	58
Figura 7.16 - Distribuzione spaziale della mediana del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche	58
Figura 7.17 - Distribuzione spaziale del coefficiente di variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione prima delle modifiche.....	59
Figura 7.18 - Distribuzione spaziale del coefficiente di variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche	59
Figura 7.19 - Distribuzione spaziale del coefficiente di L-variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione prima le modifiche	60
Figura 7.20 - Distribuzione spaziale del coefficiente di L-variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche.....	60
Figura 7.21 - Distribuzione spaziale del coefficiente di L-asimmetria del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione prima delle modifiche.....	61
Figura 7.22 - Distribuzione spaziale del coefficiente di L-asimmetria del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche.....	61
Figura 7.23 - Interpolazione spaziale della media del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione	63
Figura 7.24 - Interpolazione spaziale della deviazione standard del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione	63
Figura 7.25 - Interpolazione spaziale della mediana del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione	64
Figura 7.26 - Interpolazione spaziale del coefficiente di variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione	64
Figura 7.27 - Interpolazione spaziale del coefficiente di L-variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione	65
Figura 7.28 - Interpolazione spaziale del coefficiente di L-asimmetria del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione	65

Figura 8.1 - Distribuzione spaziale del numero di superamento di hg su h_{24}	72
Figura 8.2 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della classe 7-11.....	74
Figura 8.3 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della classe 11-14.....	75
Figura 8.4 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della classe 14-18.....	75
Figura 8.5 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della stazione 9033	76
Figura 8.6 - Verifica del valore massimo annuo per la stazione 9033 anno 1990.....	76
Figura 8.7 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della stazione 9088	76
Figura 8.8 - Verifica del valore massimo annuo per la stazione 9088 anno 1952.....	76
Figura 8.9 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della stazione 8247	78
Figura 8.10 - Verifica del valore massimo annuo per la stazione 8247 anno 1978.....	78
Figura 8.11 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della stazione 5021	79
Figura 8.12 - Doppia cumulata delle stazioni con alto numero di superamento di hg su h_{24}	82
Figura 8.13 - Distribuzione spaziale della media del fattore di Hershfield iniziale	83
Figura 8.14 - Distribuzione spaziale del coefficiente di variazione iniziale del fattore di Hershfield	84
Figura 8.15 - Distribuzione di frequenza della media e del coefficiente di variazione iniziale del fattore H	84
Figura 8.16 - Distribuzione spaziale e di frequenza di H del 1928, 1958 e 2011	85
Figura 8.17 - Distribuzione spaziale e di frequenza di H del 1995	85
Figura 8.18 - Distribuzione spaziale finale della media del fattore di Hershfield.....	86
Figura 8.19 - Distribuzione spaziale finale del coefficiente di variazione del fattore di Hershfield	86
Figura 8.20 - Distribuzione di frequenza della media e del coefficiente di variazione finale del fattore H.....	87
Figura 8.21 - Interpolazione spaziale della media del fattore H.....	88
Figura 8.22 - Boxplot della media di H	89
Figura 8.23 - Distribuzione spaziale delle stazioni con media di $H > 1.35$ relazionate con la quota	89
Figura 8.24 - Scatter plot H/quota	90
Figura 8.25 - Boxplot del coefficiente di variazione di H	90
Figura 8.26 - Distribuzione spaziale del coefficiente di variazione di H delle stazioni .	91

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 - Regioni, Province, Città Metropolitane e Comuni nel bacino del Po	4
Tabella 4.1 - Reti di osservazione in SCIA	19
Tabella 4.2 - Ulteriori fonti in SCIA	19
Tabella 5.1 - Regioni e codici identificativi in I ² -RED	23
Tabella 5.2 - Confronto per le 7 stazioni della Liguria dei record pluviometrici italiani dei dati SCIA-OMIRL-ATLANTE	28
Tabella 8.1 - Confronto e controllo dei dati con ARPA Lombardia della stazione 9027	77
Tabella 8.2 - Confronto e controllo dei dati con ARPA Lombardia della stazione 9033	77
Tabella 8.3 - Confronto e controllo dei dati con ARPA Lombardia della stazione 9289	77
Tabella 8.4 - Confronto e controllo dei dati con ARPA Lombardia della stazione 9329	77
Tabella 8.5 - Confronto e controllo dei dati con Arpae della stazione 5021	79
Tabella 8.6 - Confronto e controllo dei dati con Arpae della stazione 5271	79
Tabella 8.7 - Confronto e controllo dei dati con Arpae della stazione 5155	79

1. INTRODUZIONE

1.1 IL RUOLO DEGLI EVENTI ESTREMI E L'IMPATTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Negli ultimi anni si registra un alto numero di eventi climatici estremi: si pensi al succedersi di cicloni atlantici di grande potenza, ai fenomeni simili che si verificano nel mar Mediterraneo, alle “bombe d’acqua” che interessano anche l’Italia. Le sempre maggiori intensità e frequenza con le quali questo genere di fenomeni si manifesta sono con ogni probabilità collegate ai cambiamenti climatici, i cui effetti si riverberano sull’equilibrio dinamico del sistema climatico globale, alterandone le ciclicità e determinando effetti a catena la cui portata è difficile da prevedere e controllare. L’aumento dell’intensità dei fenomeni meteo-idrogeologici non si verifica soltanto nelle regioni oceaniche e a latitudini tropicali: negli ultimi anni, infatti, si registra un aumento di potenza anche nelle zone extra-tropicali, come ad esempio nel bacino mediterraneo. I cambiamenti climatici oltre a incidere sull’innalzamento della temperatura media superficiale, generano anche delle variazioni sulla circolazione: sempre più spesso, nelle zone temperate, la circolazione assume una direzione nord-sud, generando un più forte contrasto di masse d’aria calde e fredde che favorisce la formazione di zone a bassa pressione (*UniPD*). Dunque, anche nel Mediterraneo, il riscaldamento globale determina non solo un aumento dell’intensità, ma anche del numero di simili fenomeni.

1.2 OBIETTIVI E STRUTTURA DELLA TESI

La finalità della tesi è esplorare la possibilità di ottenere informazioni più attendibili sui dati sub-giornalieri partendo dai dati giornalieri, che sono geograficamente più densi e caratterizzati da serie più lunghe, mediante il fattore di Hershfield, per l’intero bacino del fiume Po.

Dopo questa prima sezione, il lavoro di tesi consta di altri 8 capitoli.

Nel **Capitolo 2** si delineano le caratteristiche qualitative e quantitative del bacino del fiume Po, soffermandosi sull'assetto territoriale e l'importanza della sua Autorità di Bacino Distrettuale.

Nel **Capitolo 3** si illustrano i pluviometri con le loro peculiarità, la loro classificazione, le modalità di registrazione delle stazioni pluviometriche e si introduce il ruolo del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale.

Nel **Capitolo 4** si descrivono le principali fonti da cui sono estratte informazioni quantitative sulle precipitazioni giornaliere.

Nel **Capitolo 5** sono identificate le stazioni pluviometriche di interesse con i relativi codici; vengono processati i dati e sottoposti al quality control.

Nel **Capitolo 6** sono rappresentate le stazioni pluviometriche tramite una distinzione per regione. Viene inoltre descritta l'intera struttura del database realizzato, le sue caratteristiche, l'evoluzione temporale e si confronta con il database già esistente delle precipitazioni sub-giornaliere.

Nel **Capitolo 7** sono descritte dettagliatamente le fasi di calcolo del valore massimo di precipitazione di ogni stazione per tutti gli anni presenti e si calcolano le statistiche descrittive, si esegue il controllo qualità dei dati e si procede all'interpolazione spaziale.

Nel **Capitolo 8** dopo una sintesi letteraria sul fattore di Hershfield, si analizzano i termini che concorrono alla formulazione del fattore H per il calcolo dello stesso.

Nel **Capitolo 9**, infine, sono riportate le conclusioni e gli sviluppi futuri del lavoro svolto.

2. BACINO DEL PO

La superficie del bacino idrografico del Po, alla sezione di chiusura di Pontelagoscuro (FE), è complessivamente di 86.859 km², di cui 82.787 km² in territorio italiano (le superfici extranazionali ricadenti all'interno del bacino idrografico riguardano i territori di Francia, Svizzera e Serenissima Repubblica di San Marino) e la lunghezza dell'asta principale, dalle origini fino al mare, è di 652 km.

Il fiume Po nasce dal versante settentrionale del Monte Monviso, è alimentato da 141 affluenti e, dopo aver attraversato la Pianura Padana, sfocia nel Mar Adriatico a nord di Ravenna, con un delta di 380 km². Questo vasto territorio, incluso tra gli spartiacque della catena alpina, a ovest, nord e nord-est, e della catena appenninica per tutto il tratto meridionale, è formato per il 58% da bacini montani e per il restante 42% da pianura.

Il bacino idrografico del Po interessa i territori di Piemonte, Valle D'Aosta, Liguria, Lombardia, Veneto, Emilia-Romagna, Toscana, Marche e Provincia Autonoma di Trento (Figura 2.1), comprendendo 38 province, 6 città metropolitane e 3286 Comuni che costituiscono circa il 42% dei Comuni italiani (Comuni totali italiani 7926 – fonte Istat) (Tabella 2.1).

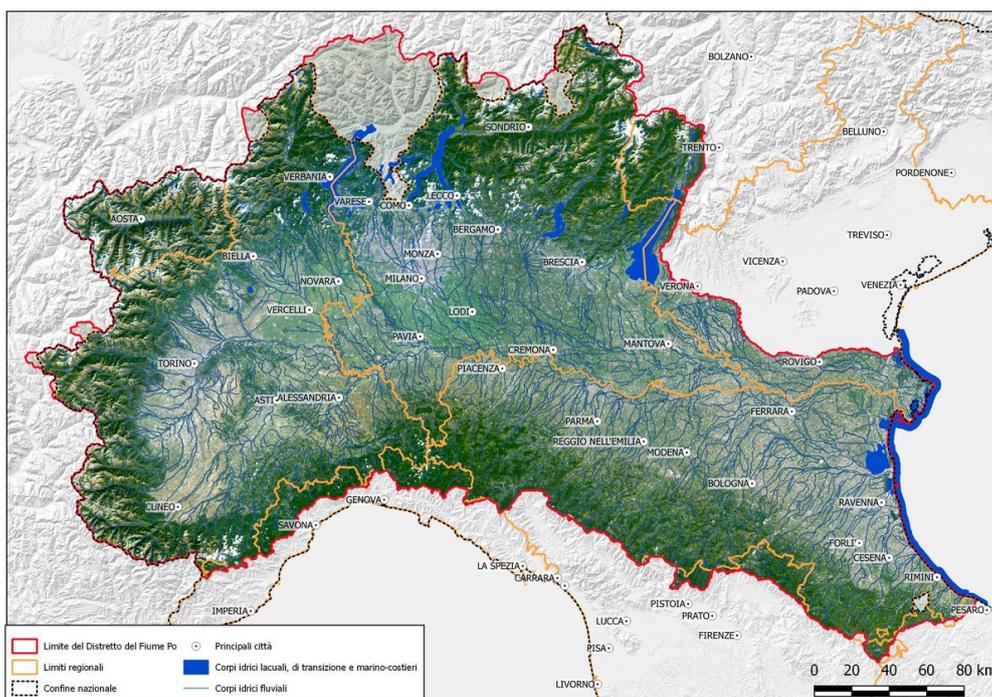


Figura 2.1 - Territori compresi nel bacino del Po
(Fonte: Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po)

Tabella 2.1 - Regioni, Province, Città Metropolitane e Comuni nel bacino del Po
(Fonte: Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po)

REGIONI	TERRITORIO [km ²]	n° PROVINCE	n° CITTA' METROPOLITANE	n° COMUNI
Piemonte	25401	7	1	1182
Valle d'Aosta	3262	1	0	74
Lombardia	23879	11	1	1509
Veneto	3464	2	1	96
Emilia-Romagna	22406	8	1	326
Liguria	1587	3	1	48
Marche	178	1	0	9
Toscana	946	4	1	5
Prov. Aut. di Trento	1664	1	0	37
TOTALE	82787	38	6	3286

Per quanto riguarda l'aspetto geologico, come si può osservare in Figura 2.2, il suolo è costituito prevalentemente da depositi fluviali.

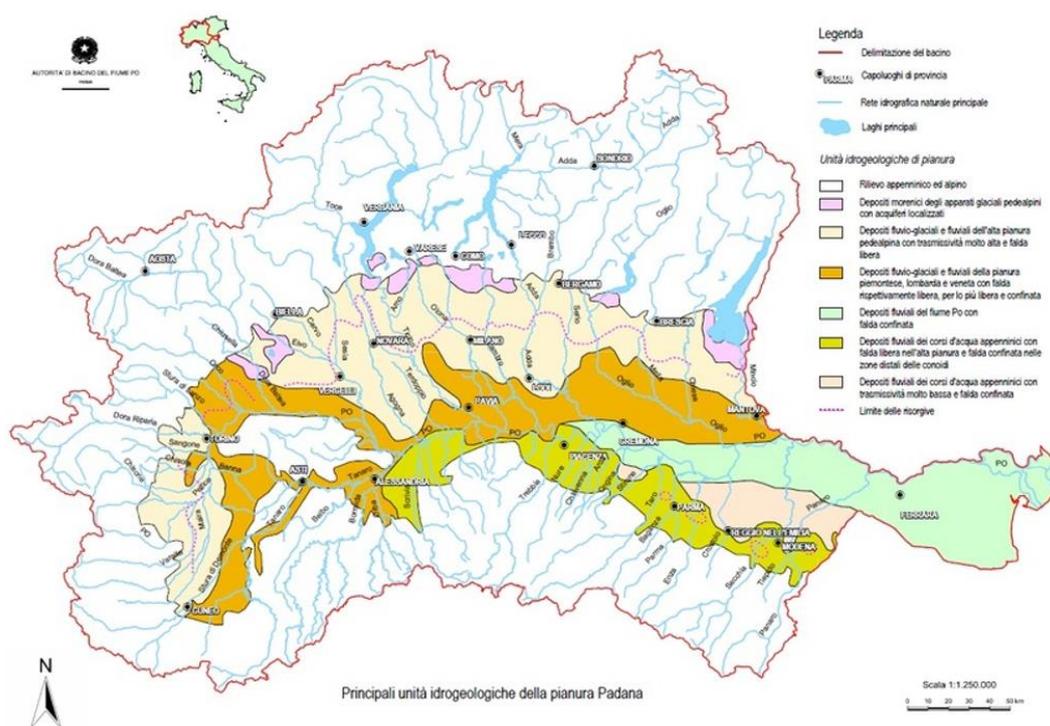


Figura 2.2 - Principali unità idrogeologiche del bacino del Po
(Fonte: Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po)

Molto importante, dal punto di vista idrologico, sia nel concorso al generale bilancio del bacino sia per la formazione delle piene, è la pianura, per l'accumulo sensibile delle acque nei numerosi canali di bonifica della Lombardia, del Veneto e dell'Emilia-Romagna, con

conseguente sensibile ritardo nel loro recapito nel collettore principale; a tale riguardo si deve anche ricordare l'analoga situazione esercitata dai grandi laghi prealpini (Garda, Iseo, Como, Maggiore), tutti regolati, nonché dei bacini artificiali (*Rusconi, 2009*).

Gli invasi nel bacino del Po presentano un volume complessivo di circa 2,2 miliardi di m³ d'acqua che, rispetto agli 8,4 miliardi dei serbatoi di tutt'Italia, rappresenta il 26% delle riserve lacustri nazionali.

La consistenza dell'acquifero padano è stimata in oltre 5 miliardi di m³.

La popolazione residente è di circa 16 milioni di abitanti, la densità territoriale è pari a 225 abitanti/km², di gran lunga superiore alla media italiana (188 abitanti/km²), con un massimo di 1.478 abitanti/km² nell'area Lambro-Seveso-Olona e con i minimi di 25 abitanti/km² nella parte alta dei bacini del Trebbia e del Parma, e 36 abitanti/km² in Valle d'Aosta (Figura 2.3).

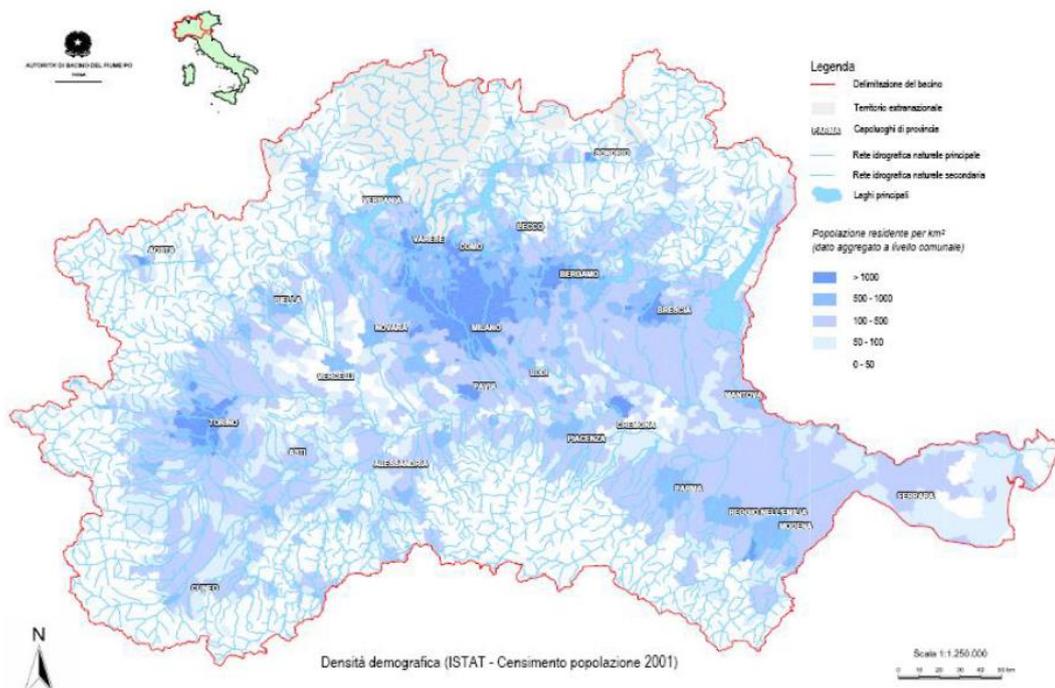


Figura 2.3 - Distribuzione della densità demografica nel bacino del Po
(Fonte: Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po)

La Carta d'Uso reale del Suolo (Figura 2.4) rappresenta, in modo quantitativo e qualitativo, lo stato attuale di utilizzo umano della risorsa suolo e fornisce un primo quadro generale dei possibili equilibri tra la disponibilità della risorsa naturale e le richieste antropiche; consente di individuare le porzioni di superfici occupate dalle classi

d'uso del suolo identificate dal dataset Corine Land Cover e la relativa percentuale rispetto all'intera superficie nazionale del bacino.

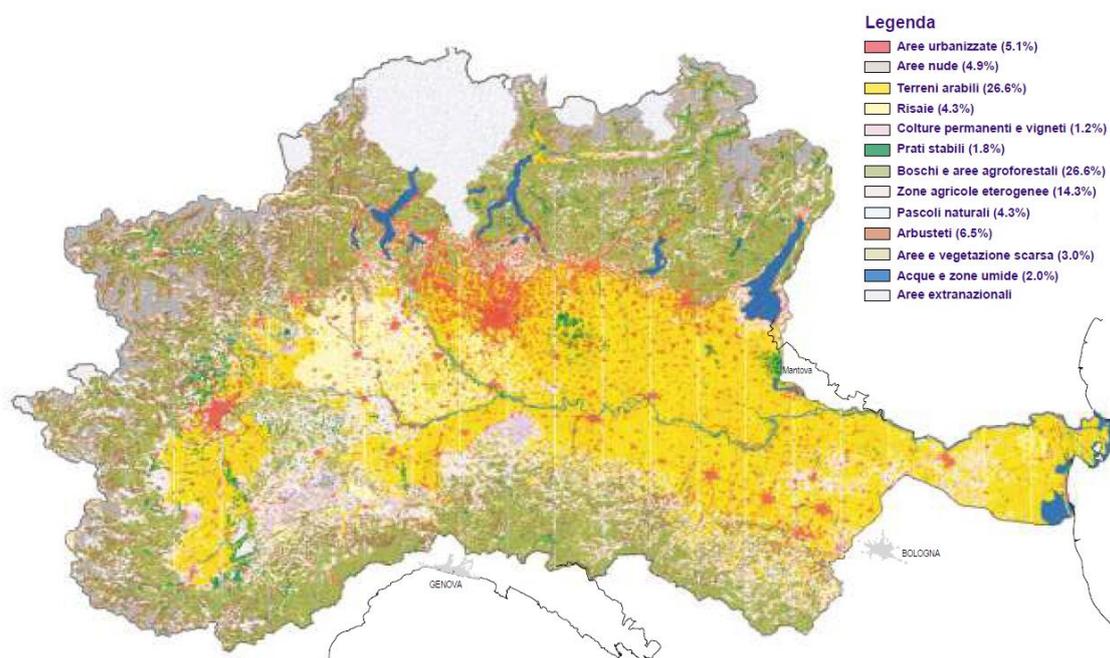


Figura 2.4 - Uso reale del suolo
(Fonte: Ministero della Transizione Ecologica)

2.1 STRUMENTI OPERATIVI A LIVELLO DI DISTRETTO DEL PO

L'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po è un Ente pubblico non economico, che opera sotto la vigilanza del Ministero della Transizione Ecologica, istituito con la Legge 221/2015. L'istituzione della Autorità di bacino del fiume Po e delle altre di rilievo nazionale è una delle maggiori innovazioni previste dalla legge 183/89, dove per la prima volta è introdotto il concetto di bacino idrografico come ecosistema unitario e ambito ottimale per le azioni di difesa del suolo e di tutela delle acque. In tal modo, formando un apposito organismo con compiti di pianificazione e programmazione, viene superata la frammentazione di competenze istituzionali che non consentirebbe una pianificazione unitaria ed integrata secondo un'impostazione propria di tutti i maggiori bacini europei, ottenendo di fatto una sinergia operativa e un'intesa unitaria fra tutti gli organi istituzionali interessati. L'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po si è insediata

nell'autunno del 1990 ed ha sede a Parma; l'Organo di indirizzo politico è la Conferenza Istituzionale Permanente, composta dai Ministri della Transizione Ecologica, delle Infrastrutture, dei Beni Culturali, delle Politiche Agricole, dal Dipartimento di Protezione Civile Nazionale, dai Presidenti delle Regioni del distretto e dal Presidente della Provincia Autonoma di Trento.

2.2 RETE DI MISURA DELLE PRECIPITAZIONI

Il *Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)* si è occupato, negli ultimi anni, della produzione di un dataset di misure di pioggia a scala globale. Tale dataset contiene anche un'importante informazione sulla densità degli strumenti usati per la sua valutazione. Un esempio è riportato in Figura 2.5 dove si evince come le stazioni pluviometriche non sono uniformemente distribuite sulla superficie terrestre, in quanto influenzate dalla storia e dagli obiettivi di gestione delle singole aree.

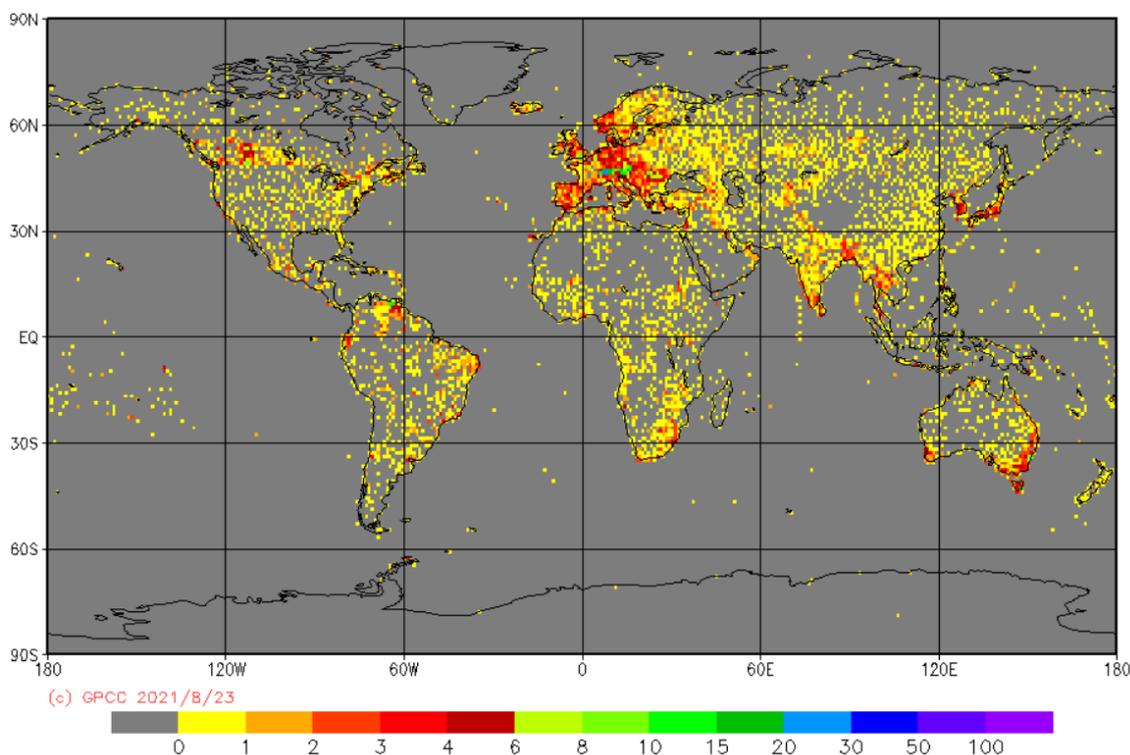


Figura 2.5 - Posizione geografica delle stazioni pluviometriche nel 2020
(Fonte: Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) - Deutscher Wetterdienst)

La rete delle stazioni utilizzate per la misura delle precipitazioni in Italia e nel bacino del Po risulta essere abbastanza fitta; diversi strumenti hanno iniziato a funzionare nella seconda metà dell'Ottocento, e alcuni perfino prima, ma un'attendibile analisi statistica può iniziare a partire dal 1920 a causa del ridotto numero di stazioni attive in precedenza. Il Servizio Idrografico dello Stato ottenne un primo grande risultato con la compilazione della carta delle precipitazioni annue per il trentennio 1921-1950 utilizzando 935 stazioni, successivamente aggiornata nel 1981 con riferimento al periodo 1921-1970 con 531 stazioni di rilevamento. Nel 1990 il Ministero dell'Agricoltura e Foreste, mediante una laboriosa e rigorosa indagine sul Po, favorì una rielaborazione degli stessi dati pluviometrici utilizzando unicamente le stazioni caratterizzate da un funzionamento regolare e continuo, giungendo a 281 stazioni con periodo di osservazione compreso tra il 1951 e il 1983. Dallo studio emerse, rispetto al periodo 1920-1950, un lieve aumento nella piovosità media annua relativa a tutto il bacino, di una-due unità percentuali. La piovosità sul bacino del Po si diversifica da zona a zona in funzione dell'orografia, dell'esposizione dei versanti e, in pianura, della distanza dai rilievi e dal mare. La precipitazione media annua dell'intero bacino è di circa 1100 mm, 1300 mm relativi ai bacini montani e 860 mm caratteristici della pianura. Della precipitazione media annua di 1100 mm, equivalente a un volume di "afflusso" medio annuo di circa 77 miliardi di m³, il Po ne convoglia al mare poco meno dei due terzi, cioè 47 miliardi di m³, pari a 670 mm di altezza d'acqua uniformemente distribuita (Rusconi, 2009). Il restante volume di 30 miliardi, corrispondente a 430 mm d'altezza d'acqua, rappresenta il consumo per l'evaporazione, la vita vegetale e l'infiltrazione nel terreno. I bacini alpini si comportano in modo diverso da quelli appenninici:

- quelli alpini, a quota più elevata, risentono maggiormente dell'influenza della temperatura; gran parte delle precipitazioni nevose invernali si fondono nella tarda primavera e nell'estate, in modo tale che il volume dei deflussi può anche superare, per diverse settimane, il valore degli afflussi;
- in quelli appenninici, a carattere principalmente pluviale, i deflussi sono generalmente inferiori agli afflussi, a causa soprattutto dell'evaporazione e dell'infiltrazione; in questo caso il regime dei deflussi segue abbastanza quello degli afflussi, condizionato però dalla permeabilità dei terreni che può smorzarne le oscillazioni, conferendo ai corsi d'acqua un certo grado di perennità.

3. MISURA, ARCHIVIAZIONE E GESTIONE DEI DATI PLUVIOMETRICI

Il pluviometro è uno strumento che consente, in ambito meteorologico e idrologico, di raccogliere e misurare la quantità di precipitazione caduta al suolo sotto forma liquida in un determinato periodo di tempo; è ampiamente diffuso poiché rappresenta una soluzione semplice, efficace ed economica. È nel Medioevo in Oriente che risalgono le prime notizie sui pluviometri e solo dal XVII secolo in Europa ci fu un notevole incremento di interesse.

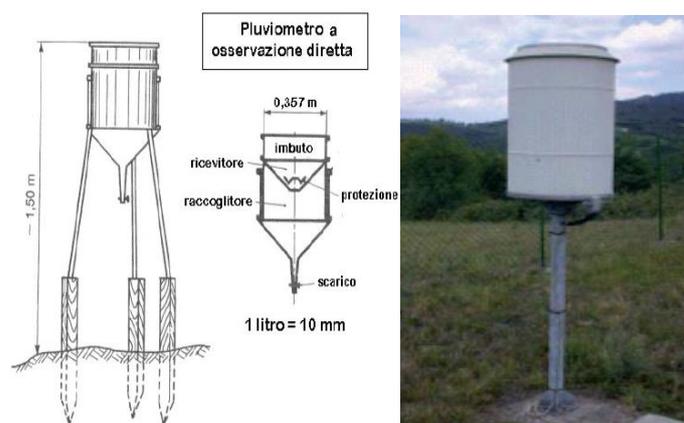
La precipitazione è definita dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale o *WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO)* come “il prodotto liquido o solido della condensazione del vapore che precipita da nuvole o si deposita dall'aria sul terreno”, considerando precipitazione pioggia, neve, grandine, rugiada, brina e nebbia depositata; generalmente le precipitazioni solide si misurano attraverso il loro equivalente in acqua.

L'altezza di precipitazione o di pioggia (abituamente la tipologia di precipitazione che interessa è lo stato liquido) è definita come l'altezza della lama d'acqua che coprirebbe una superficie orizzontale, qualora tutta l'acqua raccolta dalla superficie fosse trattenuta, così da formare uno strato di spessore uniforme; è importante specificare sempre l'intervallo di tempo in cui la precipitazione è caduta.

3.1 CARATTERISTICHE DEI PLUVIOMETRI

Un pluviometro (Figura 3.1) è un recipiente cilindrico, nella cui bocca, disposta orizzontalmente, è sistemato un imbuto raccoglitore. L'acqua si raccoglie sul fondo del pluviometro, quando questo è di dimensioni tali da poter essere agevolmente maneggiato, oppure in un secondo recipiente, più piccolo disposto al suo interno. Lo scopo dell'imbuto è quello di ridurre il più possibile le perdite per evaporazione. A questo scopo il foro, che

è coperto da una sottile rete metallica, deve essere il più piccolo possibile. Gli strumenti devono essere dotati di bolla di livello per una facile e precisa messa in opera.



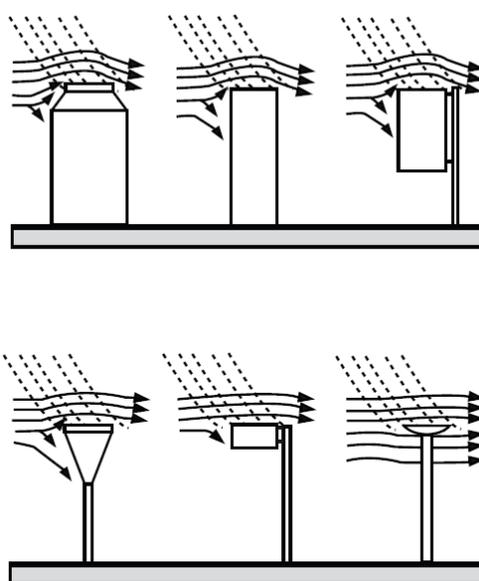
*Figura 3.1 - Pluviometro
(Fonte: ISPRA)*

Esistono varie tipologie di pluviometri contraddistinti dal loro principio di funzionamento: manuali, meccanici, elettronici, ottici, impiegati per le misurazioni della neve o in mare aperto. Le osservazioni dirette delle precipitazioni su scala puntuale possono essere ottenute solo da pluviometri installati sulla superficie del suolo; risultano non rappresentative in quanto localizzate in un'area ristretta e dunque non utilizzabili per avere una rappresentazione dettagliata del territorio ma solo per avere un'idea dell'andamento generale delle precipitazioni. Ulteriore svantaggio del dispositivo consiste nella possibilità di ottenere misure influenzate dalla presenza dei venti che si discostano dalla realtà, sottostime o sovrastime dipendenti dalla direzione del vento, causate dalle intemperie, dalle temperature estreme stagionali, dalla formazione di ghiaccio e sporadicamente, considerando l'evolversi dei materiali utilizzati, dalla dilatazione termica.

I pluviometri vengono posizionati ad un'altezza dal suolo di circa 1.5 m in un luogo aperto, distanti da alberi e da fabbricati, in modo che la pioggia sia in ogni parte libera di cadere sui ricevitori dei pluviometri. La WMO raccomanda l'installazione degli strumenti in posizione piana, ad una distanza pari ad almeno il doppio dell'altezza della bocca rispetto a qualsiasi ostacolo, al suolo o a poca distanza da esso, in modo da evitare l'in-spashing, ovvero l'ingresso di gocce o piccole quantità d'acqua nello strumento in seguito al rimbalzo su altre superfici. Inoltre, suggerisce bordi rialzati per l'ingresso del pluviometro. La vegetazione, se presente in prossimità del pluviometro, va potata ad

un'altezza al di sotto del collettore di ingresso, in modo tale da non interferire sulla misura, oppure si provvede all'installazione di opere di salvaguardia, come ad esempio un paravento.

La WMO, ponendo particolare attenzione alla principale causa di sottostima della misura di precipitazione, il vento, mostra, in base alle forme dei pluviometri standard accettati, le deformazioni dei flussi subite nei pressi dell'apertura del sistema di raccolta; in Figura 3.2 le linee orizzontali rappresentano il vento e quelle tratteggiate la traiettoria dell'acqua in presenza del vento; si evince come si possono collegare deformazioni inferiori a un diametro minore e, verosimilmente, anche gli errori dovuti alla presenza del vento saranno più piccoli.



*Figura 3.2 - Deformazione del flusso dell'acqua a causa del vento
(Fonte: WMO)*

L'area della bocca deve risultare uniforme e non deve variare a causa della temperatura più dello 0,5%; si deve eludere in entrata e in uscita che le gocce rimbazzino, per far ciò si impiega un bordo rialzato con un'inclinazione della parete interna della bocca maggiore del 45° ed evitare l'evaporazione con apposito materiale che consente lo scivolamento dell'acqua nello strumento di misura (WMO).

Per fini pratici è basilare conoscere l'intensità di precipitazione o intensità di pioggia, che può essere istantanea o media, quella media è il rapporto (espresso in [mm/h]) tra l'altezza di precipitazione e la durata corrispondente. Nel passato e alle volte anche nel presente la registrazione dell'altezza di pioggia era ed è effettuata in forma di grafico su un

diagramma; dunque, il pluviografo (Figura 3.3) è costituito da un sensore, che rileva istante per istante il valore dell'altezza di pioggia caduta, e da un apparato di registrazione: foglio di carta (Figura 3.4), nastro magnetico o memoria solida.



*Figura 3.3 - Pluviografo
(Fonte: ISPRA)*

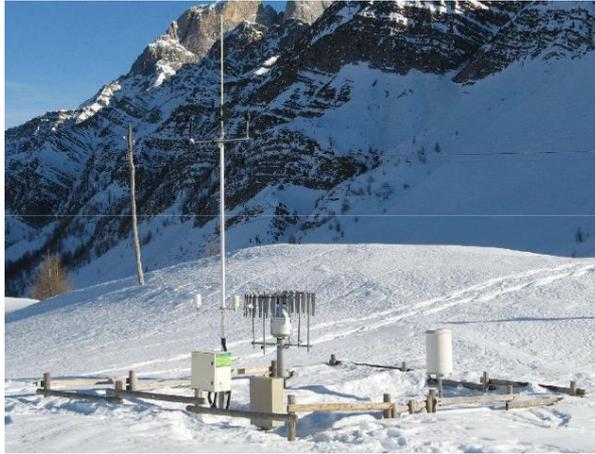


*Figura 3.4 - Tipico registratore meccanico con rotoli di carta
(Fonte: Morbidelli et al., 2021)*

3.2 CLASSIFICAZIONE DEI PLUVIOMETRI

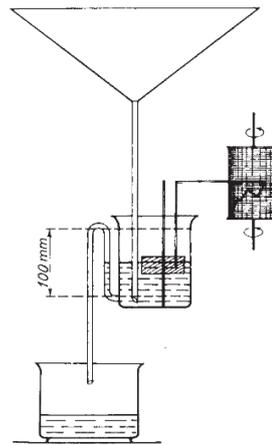
Oltre al semplice pluviometro ‘standard’ che misura il livello della precipitazione raggiunto all’interno di un recipiente, la WMO classifica i pluviometri in 3 categorie:

- pluviometro a peso: misura la quantità caduta all’interno del collettore per differenza di peso rispetto alla quantità precedentemente contenuta (Figura 3.5).



*Figura 3.5 - Pluviometro a peso
(Fonte: ARPA Veneto)*

- pluviometro a sifone o a galleggiante: si avvale di un contenitore in grado di riempirsi, in cui un galleggiante rileva la differenza di altezza della precipitazione raccolta (Figura 3.6).



*Figura 3.6 - Pluviometro galleggiante
(Fonte: ISPRA)*

- pluviometro a bascula: composto da due contenitori che si riempiono e svuotano alternativamente ruotando su un perno al raggiungimento di un volume di acqua noto e proporzionale alla dimensione della bocca (Figura 3.7).



*Figura 3.7 - Interno del pluviometro a bascula
(Fonte: ARPA Veneto)*

Il primo è adatto a tutti i tipi di precipitazione, mentre gli altri due sono principalmente idonei alla misura della pioggia liquida.

Un dispositivo più recente è il disdrometro (Figura 3.8), in grado di rilevare la distribuzione delle dimensioni e la velocità delle idrometeorie in caduta.



*Figura 3.8 - Disdrometro
(Fonte: ARPA Lombardia)*

Attualmente, la maggior parte dei dati di pioggia è registrata continuamente in data logger digitali (Figura 3.9), consentendo l'adozione di qualsiasi intervallo di tempo di aggregazione, anche pari a 1 min.



*Figura 3.9 - Pluviometro con data logger digitale
(Fonte: Morbidelli et al., 2021)*

3.3 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLA RILEVAZIONE

Fino al 1990 circa, le osservazioni delle precipitazioni venivano registrate su rotoli di carta tipicamente con tempo di aggregazione di 30 minuti o 1 ora; prima della Seconda guerra mondiale, la risoluzione temporale delle precipitazioni era giornaliera, con registrazione manuale una volta al giorno ad un'ora fissa. Le modalità di registrazione delle stazioni pluviometriche sono cambiate nel tempo, passando prima dalle registrazioni manuali giornaliere a registratori meccanici e poi alla registrazione continua con registratori di dati. I passaggi da un tipo di registrazione all'altro non sono stati simultanei. Le osservazioni delle precipitazioni sono disponibili con diverse risoluzioni temporali, con valori tipici compresi tra 1 min e 1 giorno, a causa dello sviluppo dei sistemi di registrazione nel tempo.

Nelle pubblicazioni del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale le altezze di precipitazione ai pluviometri sono misurate con la precisione di 0.2 mm e lette normalmente una volta al giorno.

Gli eventuali errori di misura (la quantità di acqua piovana persa durante il movimento di ribaltamento della bilancia, l'influenza del vento sulle misurazioni delle precipitazioni a causa dell'interazione tra il corpo del misuratore e il flusso d'aria, detriti nel secchio,

posizione inappropriata del sensore) rimangono per lo più ignorati e le informazioni storiche contenute nelle serie di precipitazioni archiviate continuano a essere influenzate da distorsioni e incertezze significative.

3.4 SERVIZIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO NAZIONALE

Il Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) istituito nel 1917 era deputato alla pubblicazione dei dati relativi alle osservazioni pluviometriche in tabelle mensili nei Bollettini Idrografici. Dal 1921, dato l'incremento del numero delle stazioni, i Bollettini Idrografici vennero pubblicati in due fascicoli denominati PARTE I e PARTE II: la prima comprendeva i risultati delle osservazioni pluviometriche e idrometriche giornaliere, espresse in mm, cadute nelle 24 ore tra le 09:00 del giorno in cui si effettuava la misura e le 09:00 del giorno precedente; la seconda era divisa in due sezioni, A-Pluviometria e B-Idrometria. La sezione A, di interesse in questo studio, comprendeva l'anagrafica delle stazioni pluviometriche operative durante l'anno (tipologia degli apparecchi di misura, coordinate geografiche, quota sul mare, altezza dal suolo, anno di inizio funzionamento, ente proprietario e gestore, dati dell'osservatore), i totali mensili e annui delle precipitazioni e dei giorni piovosi, la carta delle isoiete, i volumi di afflusso meteorico riferiti a ciascun bacino imbrifero, le massime precipitazioni giornaliere per ciascun mese, i valori delle precipitazioni di maggiore intensità registrate dai pluviografi o segnalate dagli osservatori, brevi indicazioni sulle precipitazioni nevose. I Bollettini Idrografici denominati Annali Idrologici, dal 1927 al 1951, sono stati integrati e modificati fino ad assumere una forma consolidata includendo anche misure ed elaborazioni riguardanti la termometria, il bilancio idrologico, la freaticimetria, il trasporto solido in sospensione e la mareografia.

Ad oggi le stazioni sono costituite da strumentazioni meccaniche, integrate o sostituite con strumenti automatici dalle nuove reti regionali, a partire dagli anni '90, con lo smantellamento del SIMN, previsto con il D.Lgs. 112/1998, che ha sancito nel 2002 il trasferimento delle attività di raccolta e gestione dei dati a livello regionale, ovvero alle 19 Regioni e alle 2 Province Autonome.

4. BANCHE DATI DELLE PRECIPITAZIONI INTENSE

In questo capitolo sono illustrate le principali fonti da cui sono estratte informazioni quantitative sulle precipitazioni giornaliere nel bacino del Po, riferite al periodo dal 1910 al 2019.

Il territorio comprende le regioni di Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Emilia-Romagna e parte di Liguria, Veneto, Marche, Toscana e Provincia Autonoma di Trento.

I dati sono stati reperiti da:

- Banca dati ARPA Piemonte;
- Banca dati VAPI (Piemonte, Valle d'Aosta, Liguria, Lombardia);
- Archivio SCIA (Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Emilia-Romagna, Liguria, Veneto, Marche, Toscana e Prov. Aut. di Trento);
- Banca dati OMIRL (Liguria);
- Banca dati ATLANTE CLIMATICO DELLA LIGURIA (Liguria).

4.1 ARPA PIEMONTE

L'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte è un ente pubblico dotato di autonomia amministrativa, tecnico-giuridica, patrimoniale e contabile; attua gli indirizzi programmatici della Regione Piemonte nel campo della previsione, prevenzione e tutela ambientale, fornisce supporto e assistenza agli Enti nell'esercizio delle loro funzioni amministrative, svolge attività di controllo dei fattori geologici, meteorologici e nivologici per la tutela dell'ambiente, nonché per la previsione finalizzata alla prevenzione dei rischi naturali, utilizzando strumentazioni automatiche d'avanguardia per il rilevamento al suolo e in atmosfera. L'interpretazione dei dati acquisiti e la loro elaborazione modellistica consentono la continua sorveglianza dell'ambiente e del territorio, la gestione dei sistemi di previsione, allertamento e monitoraggio, l'aggiornamento della documentazione climatologica utile alle attività di pianificazione e

programmazione. L'ARPA nella sezione Rischi Naturali, in precipitazioni, offre la possibilità di visionare le precipitazioni giornaliere su tutta la rete regionale. La banca dati utilizzata in questo studio comprende informazioni meteorologiche relative al periodo tra il 1988 e il 2015.

4.2 VAPI

Il Progetto sulla Valutazione delle Piene (VAPI) in Italia condotto dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), predispone una procedura uniforme sull'intero territorio nazionale per la valutazione delle portate di piena naturali, fornendo uno strumento ed una guida agli operatori del settore per comprendere i fenomeni coinvolti nella produzione delle portate di piena naturali e per effettuare previsioni sui valori futuri delle piene. Il rapporto nazionale presenta, in maniera sintetica, i risultati ottenuti nelle diverse regioni del territorio nazionale. I rapporti regionali VAPI sono stati coordinati da 12 UU.OO. del GNDCI-CNR impiegando dati di circa 6000 stazioni pluviometriche con 50 anni di osservazione e 400 bacini idrografici, completamente caratterizzati per geomorfologia e per le principali grandezze climatiche ed idrologiche. Sono stati utilizzati i dati osservati nelle stazioni di misura pluviometriche e pluviografiche del SIMN fino al 1986, costituendo un database comprendente 366 stazioni di misura (270 nel bacino padano e 96 in Liguria) con almeno 20 anni di osservazione e numerosità media di 34 anni e identificate 125 stazioni idrometriche con almeno 9 anni di misura fino al 1970. In collaborazione con la Sezione di Genova dello stesso SIMN è stato integrato il campione della Liguria Tirrenica con i dati di 74 stazioni (57 nel bacino padano e 17 in Liguria) dal 1970 al 1993 ottenuti dalle registrazioni idrometrografiche con numerosità variabile da 9 a 60 anni, e valor medio di 23 anni.

4.3 SCIA

SCIA è il sistema nazionale per la raccolta, elaborazione e diffusione di dati climatici, realizzato dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) in

collaborazione e con i dati degli organismi titolari delle principali reti osservative presenti sul territorio nazionale elencati in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 - Reti di osservazione in SCIA

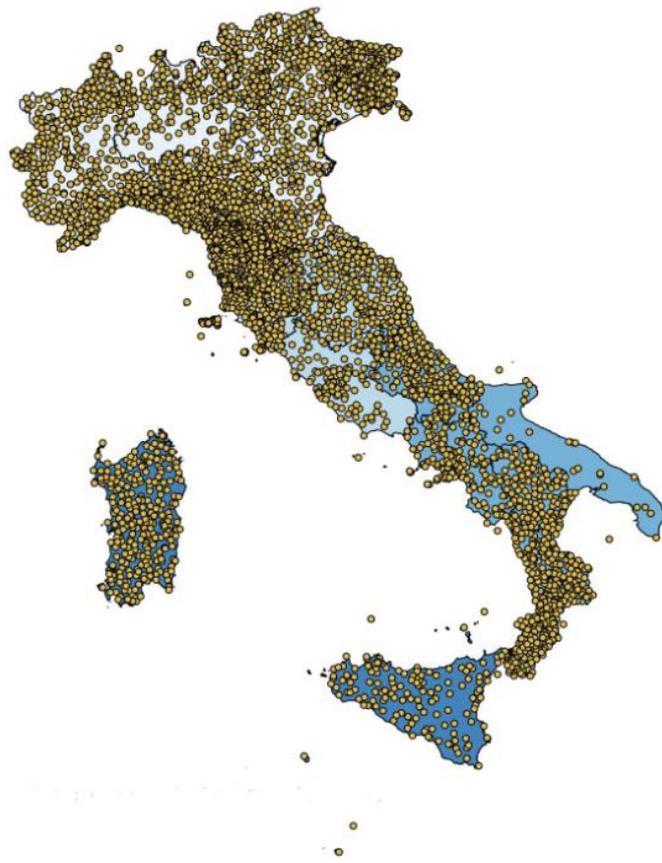
Servizio Meteorologico dell' Aeronautica Militare
CREA- CMA
ARPA Emilia Romagna
ARPA Friuli Venezia Giulia
ARPA Valle d'Aosta
ARPA Piemonte
ARPA Veneto
ARPA Lombardia
ARPA Liguria
ARPAS SardegnaDipartimento Meteorologico
ALSIA Basilicata
ARPA Campania e Centro Funzionale di Protezione Civile
SIAS Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano
ASSAM Centro Operativo Agrometeo Regione Marche
ASSOCODIPUGLIA Servizio Agrometeorologico Regione Puglia
ARSIAL Servizio Agrometeorologico Regione Lazio
ISPRA Rete Mareografica Nazionale
OSSERVATORIO DELLE ACQUE Regione Sicilia
Regione Marche Centro Funzionale
ARPA Calabria
SITI WEB di Meteo Trentino, Prov. Bolzano,
Regione Umbria Servizio Idrografico

Ulteriori fonti di dati che contribuiscono al dataset di precipitazione sono riportate in Tabella 4.2.

Tabella 4.2 - Ulteriori fonti in SCIA

Servizio Idrografico e Mareografico – Regione Abruzzo
Centro Funzionale – Regione Autonoma Valle d’Aosta
Protezione Civile – Regione Basilicata
Provincia Autonoma di Bolzano – Alto Adige
Arpacal, Centro Funzionale multirischi – Regione Calabria
Protezione Civile – Regione Campania
Protezione Civile – Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
Centro Funzionale Regionale – Regione Lazio
Repertorio Cartografico – Regione Liguria
Protezione Civile – Regione Marche
Protezione Civile – Regione Molise
Centro Funzionale – ARPA Piemonte
Protezione Civile – Regione Puglia
Osservatorio Acque – Regione Sicilia
Settore Idrologico Regionale – Regione Toscana
ARPAV – Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio
Centro Funzionale Protezione Civile – Provincia Autonoma di Trento
Servizio Meteorologico dell’Aeronautica Militare (Rete sinottica)
Sistema Informativo Idrologico HIScentral

Esso risponde all'esigenza di armonizzare e standardizzare i metodi di elaborazione e rendere disponibili i dati, gli indici e gli indicatori utili alla rappresentazione e alla valutazione dello stato, delle variazioni e delle tendenze del clima in Italia. Nel 1930 il numero di stazioni con dati di precipitazione era 1000, aumentando negli anni (1500 stazioni nel 1951) per arrivare ad oggi a 4740 (Figura 4.1). Una parte considerevole dei dati di precipitazione deriva dall'ex SIMN. Le serie temporali di dati meteorologici sono comprese tra il 1910 e il 2019. Attraverso il sito web è possibile visualizzare sotto forma di tabelle, grafici, mappe e scaricare i dati disponibili su file di testo.



*Figura 4.1 - Stazioni di precipitazione cumulata SCIA
(Fonte: SCIA)*

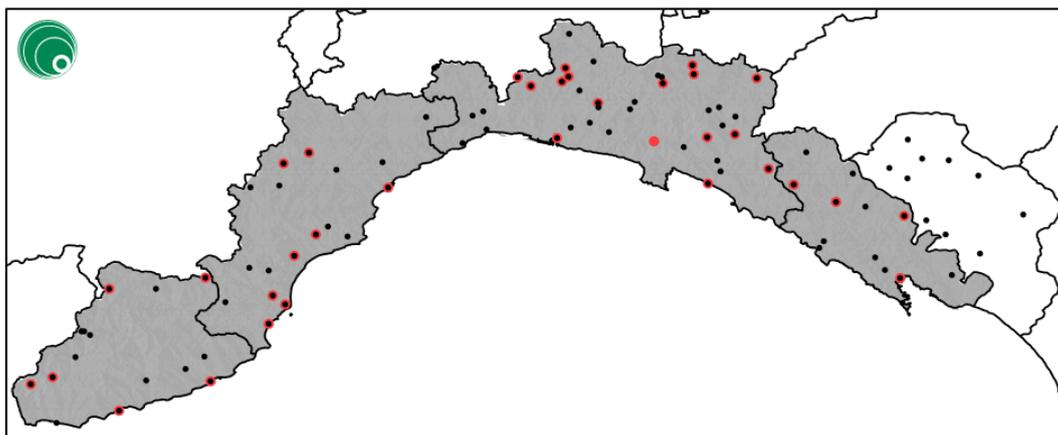
4.4 OMIRL

L'ARPAL (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure) garantisce il monitoraggio meteo idrologico quantitativo sul territorio regionale, la cui principale fonte di dati è rappresentata dalla rete OMIRL (Osservatorio Meteo Idrologico della Regione

Liguria), gestita dal CFMI-PC (Centro Funzionale Meteo Idrologico di Protezione Civile della Regione Liguria). Consta di circa 200 stazioni meteo idrologiche in telemisura e da circa 30 stazioni meccaniche, residuo delle vecchie stazioni tradizionali ereditate dall'ex Servizio Idrografico Nazionale.

4.5 ATLANTE CLIMATICO DELLA LIGURIA

Nell'Atlante Climatico della Liguria sono state selezionate, completate e aggiornate le serie storiche ufficiali di precipitazione e temperatura rappresentative della climatologia ligure; l'obiettivo è quello di fornire un aggiornamento della climatologia della precipitazione soprattutto a chi si occupa di pianificazione e gestione del territorio e delle sue risorse. Ha selezionato un ristretto campo di siti storici, caratterizzati da serie di dati lunghe almeno un trentennio, omogenee ed affidabili per garantire un'adeguata analisi climatologica. È possibile visionare e scaricare dal sito web le serie temporali di dati meteorologici delle 94 stazioni disponibili (Figura 4.2, in nero i sensori pluviometrici e in rosso quelli termometrici), per l'arco temporale che copre il periodo dal 1960 al 2010, ovviamente variabile da sito a sito.



*Figura 4.2 - Geolocalizzazione delle stazioni di ATLANTE
(Fonte: ARPAL Liguria)*

5. ELABORAZIONI PRELIMINARI

Il punto di partenza è la creazione di un database di dati di precipitazioni giornaliere del bacino del Po, che racchiude le regioni di Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Emilia-Romagna e parte di Liguria, Veneto, Marche, Toscana e Provincia Autonoma di Trento; in questo studio la Liguria è stata considerata nella sua interezza, in quanto è una zona con orografia molto complessa e dovendo interpolare spazialmente, è stato opportuno inserire un buffer intorno quest'area.

Le misure disponibili nelle diverse banche dati necessitano di una struttura univoca che possa contenerli in modo dettagliato e ben organizzato. Per l'unione delle diverse fonti di dati, si sono utilizzati:

- i file della banca dati ARPA, in formato csv, contenenti data (giorno/mese/anno), precipitazione giornaliera dalle 00:00 alle 00:00 [mm], altre informazioni non utilizzate relative a temperatura e umidità;
- i file della banca dati VAPI, in formato txt, contenenti codici VAPI, data (giorno/mese/anno), precipitazione giornaliera [mm];
- i file scaricati manualmente stazione per stazione dell'archivio online SCIA, in formato csv, contenenti latitudine, longitudine, data (anno/mese/giorno) e valore di precipitazione [mm];
- i file della banca dati OMIRL, in formato txt, divisi per anno, contenenti tutte le stazioni operative, data (giorno/mese/anno), precipitazione giornaliera [mm];
- i file della banca dati ATLANTE, in formato prn, contenenti data (anno, mese e giorno, nella forma AAAAMMGG, in assenza di separatore fra di loro) e precipitazione giornaliera [mm].

5.1 COSTRUZIONE DELL'ANAGRAFICA STAZIONI

Nel 2020 è stato creato un database, denominato "Improved Italian - Rainfall Extreme Dataset" o I²-RED, per permettere un'analisi precisa della frequenza degli estremi delle precipitazioni, costituendo un dataset omogeneo a livello nazionale. Comprende dati di

precipitazioni massime annuali acquisite in 1, 3, 6, 12 e 24 ore consecutive dal 1916 al 2019 da 5265 pluviometri (Mazzoglio et al., 2020). Il dataset presenta un alto livello di uniformità: tutte le misure di pioggia sono espresse in mm, mentre le posizioni di tutti i pluviometri sono convertite in un unico sistema di riferimento, Universal Transverse Mercator (ovvero WGS 84 UTM 32 N, EPSG 32632). Nel database ad ogni regione è attribuito uno specifico numero progressivo che va da 1 a 21, e questo numero è riportato nell'ID della stazione pluviometrica assegnata a I²-RED. Ad ogni codice identificativo della stazione la prima cifra (da 1 a 21) identifica la regione di appartenenza e le ultime tre cifre si riferiscono ad un numero progressivo all'interno di ciascuna regione.

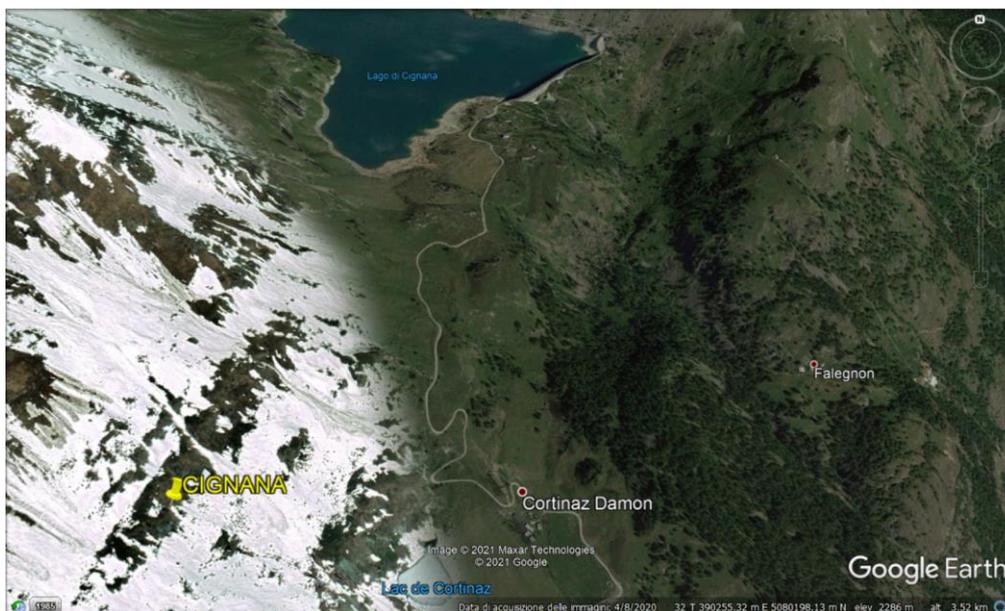
Nel presente lavoro le regioni interessate sono il Piemonte, la Valle d'Aosta, la Lombardia, l'Emilia-Romagna, la Liguria, parte del Veneto, delle Marche, della Toscana e della Provincia Autonoma di Trento; in Tabella 5.1 sono riportati i relativi codici identificativi.

Tabella 5.1 - Regioni e codici identificativi in I²-RED

ID	REGIONE
5	Emilia-Romagna
8	Liguria
9	Lombardia
10	Marche
12	Piemonte
16	Toscana
17	Provincia Autonoma di Trento
20	Valle d'Aosta
21	Veneto

Preliminarmente è stata verificata la presenza di tutte le stazioni oggetto di interesse nel database di I²-RED: qualora nel database I²-RED risultasse la stazione e il periodo delle misurazioni coincidesse con il periodo delle precipitazioni giornaliere, i dati sarebbero stati assegnati al medesimo codice identificativo della stessa; in caso contrario, si sarebbe provveduto all'assegnazione di un nuovo codice identificativo (anteponendo un '1' all'ID della regione). In quest'ultimo caso, avendo a disposizione le coordinate geografiche della stazione fornite da SCIA, dopo la conversione di latitudine e longitudine nel sistema di coordinate Universal Transverse Mercator (ovvero WGS 84 UTM 32 N, EPSG 32632), effettuata per uniformarsi alla struttura di I²-RED, è stata ricavata la quota. Sono state importate le coordinate stazione per stazione su Google Earth individuando la posizione

esatta e ricavando di conseguenza la quota. Nella Figura 5.1 si riporta come esempio la stazione di Cignana (AO), codice identificativo 120011, quota 2286 m.



*Figura 5.1 - Esempio geolocalizzazione stazione su Google Earth
(<https://www.google.it/intl/it/earth/>)*

Per ogni regione oggetto di studio si aveva a disposizione l’anagrafica delle stazioni già inserite nel database I²-RED, strutturata in un file Excel convertito poi in .csv, dove per ogni stazione sono indicati codice identificativo ID, nome, due campi con valori “NaN” (che possono essere utilizzate per l’inserimento delle coordinate WGS 84), quota, coordinata X e Y del sistema di Universal Transverse Mercator (WGS 84 UTM 32 N, EPSG 32632). Per le nuove stazioni individuate si è proceduto alla creazione di un’anagrafica avente le stesse caratteristiche della precedente ed è stato creato il relativo shapefile.

5.2 PROCESSAMENTO DATI

Nel ricostruire le serie storiche delle stazioni pluviometriche nell’area di interesse, si parte da 2635 file di dati grezzi ricavati dalle varie banche dati disponibili.

I file sono stati reimpostati tutti seguendo lo stesso criterio: data (anno/mese/giorno) e relative precipitazioni giornaliere [mm]. Si è proceduto per ogni categoria di file ad un controllo:

- ai file della banca dati ARPA si è sostituito il ‘.’ alla ‘,’; si è tenuto conto del loro criterio di riportare il valore della precipitazione giornaliera al giorno successivo, poiché considerata dalle 00:00 alle 00:00;
- ai file della banca dati VAPI, dopo la conversione a file .csv, si è sostituito il valore ‘NaN’, ‘Not a Number’, e il valore ‘999.9’ con un numero negativo privo di senso, ‘-9999’, per agevolare la successiva operazione su Matlab; operazione meticolosa è stata condotta per risolvere manualmente sui .csv un problema di alcuni file .txt che contenevano errori un giorno al mese per tutti gli anni della serie storica (13 ottobre o 14 ottobre o 13 novembre);
- ai file dell’archivio online SCIA si è sostituito il ‘NA’ con un numero negativo ‘-9999’;
- ai file della banca dati OMIRL si è proceduto alla creazione di un file .csv per ogni stazione con gli anni di interesse;
- ai file della banca dati ATLANTE, dopo la conversione a file .csv, si sono dovute riscrivere le date, causa assenza separatore, e sono stati sostituiti i valori ‘-999.9’ e ‘-777.7’ con ‘-9999’.

Al termine, ogni singolo file è stato salvato come file csv.

La maggior parte del lavoro richiesto per costruire il nuovo database è stata svolta, a causa della complessità delle operazioni di data-merging, in modalità manuale, ispezionando visivamente i dati.

Particolare attenzione è stata posta in fase di accorpamento dei dati giornalieri derivanti da diverse banche dati riferiti allo stesso periodo, evitando così eventuali sovrapposizioni dello stesso arco temporale, che avrebbero potuto creare complicazioni durante l’unione delle misurazioni delle precipitazioni giornaliere e la creazione del database.

È stato opportuno creare uno script Matlab che impacchettasse i file .csv per creare il database delle precipitazioni giornaliere, di seguito denominato “Giornaliere”, e per ogni stazione si sono plottati i dati storici disponibili.

Da questo percorso operativo si sono ottenuti 2144 grafici delle serie storiche corrispondenti alle stazioni pluviometriche.

5.3 QUALITY CONTROL DEI DATI

Per verificare l'andamento corretto dei dati ed eventuali piccoli errori o imperfezioni si è proceduto all'analisi stazione per stazione del grafico della serie storica corrispondente: per valori significativamente alti di precipitazione (si è considerato un valore pari a 525/550 mm di pioggia giornaliera) si è verificato che effettivamente fossero valori reali e non dovuti a problemi possibili e vari dello strumento, si è cercato nelle fonti storiche eventuali traccia di alluvione del giorno nel luogo di interesse, aprendo così due possibili scenari:

- 1) qualora si fosse trovata una traccia storica di alluvione avvenuta in quel giorno e in quel luogo, avendo una dimostrazione, si sarebbe lasciato invariato il valore di precipitazione, come in questo caso:

stazione di Lavagnina Centrale (AL), codice identificativo 12093, valore di precipitazione giornaliera pari a 554 mm nel giorno 14/08/1935 (Figura 5.2).

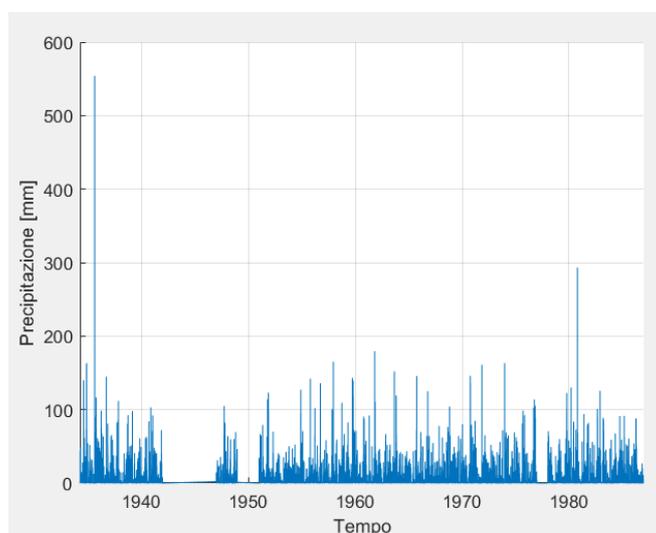


Figura 5.2 - Serie storica di Lavagnina Centrale (AL)

- 2) qualora non si fosse trovata nessuna traccia, si sarebbe modificato manualmente il valore di precipitazione con un numero negativo privo di senso, pari a '-9999', come in questo caso:

stazione di Ceresole Reale (TO), codice identificativo 12427, valore di precipitazione giornaliera pari a 2002 mm nel giorno 01/12/1916 (Figura 5.3 e 5.4).

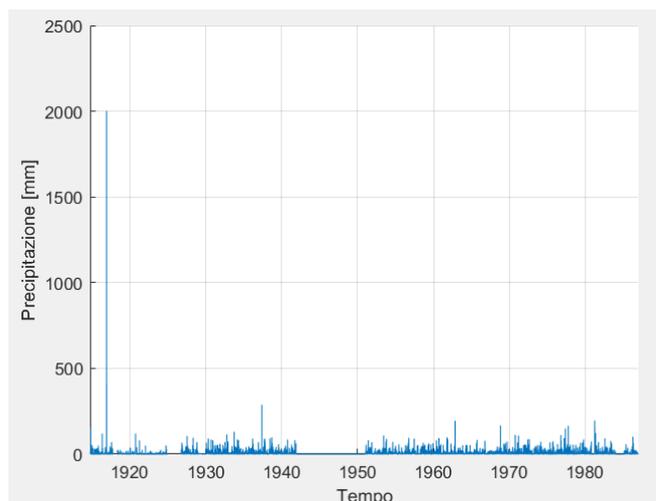


Figura 5.3 - Serie storica di Ceresole Reale (TO)

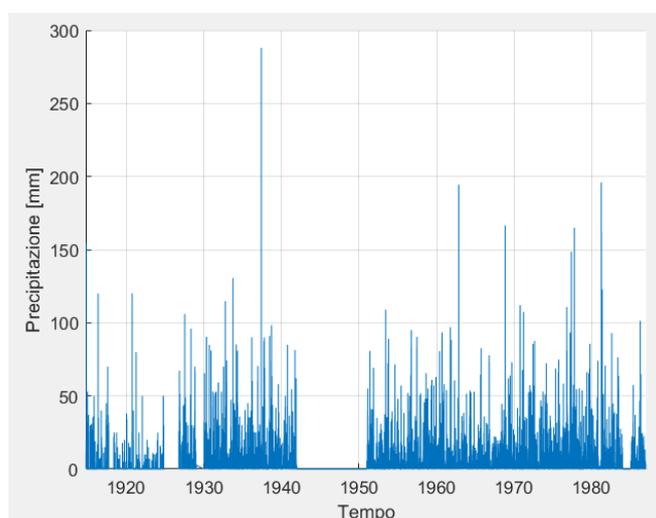


Figura 5.4 - Serie storica di Ceresole Reale (TO) modificata

Ulteriore controllo è stato eseguito dalla fonte della pagina web *'Record Meteorologici in Real Time'* che riporta le stazioni in cui si è registrato il maggior accumulo di pioggia nelle 24 ore. Tra le regioni italiane citate in questo elenco compare solo la regione Liguria tra le regioni del bacino del Po; si è proceduto alla verifica del valore riportato con quello ricavato dalle varie fonti delle 7 stazioni segnalate: Genova Bolzaneto (GE), Valleregia (GE), Pontedecimo (GE), Monte Cappellino (GE), Madonna della Guardia (GE), Brugnato (SP) e Rossiglione (GE).

Dal controllo è emerso che i dati grezzi provenienti dall'archivio SCIA delle 7 stazioni segnalate nel giorno di maggior accumulo riportano come misura di precipitazione giornaliera un valore pari a "NA" o un valore molto più basso.

Le misure di precipitazione del database delle 7 stazioni pluviometriche nei giorni menzionati derivano 6 da SCIA e 1 da OMIRL. Per ovviare a questo problema di SCIA si è provveduto manualmente stazione per stazione a verificare nelle altre fonti disponibili (banca dati di OMIRL e ATLANTE) il valore riportato nel giorno di riferimento. Se nel giorno è disponibile una misurazione in OMIRL o ATLANTE, si sostituisce manualmente il valore, altrimenti si lascia invariato il valore molto più basso o “NA”. Come si evince dalla Tabella 5.2, per 4 stazioni si sono lasciati i valori grezzi di SCIA, per 1 stazione il valore grezzo di OMIRL (che risulta anch’esso sottostimare l’effettivo dato giornaliero) e in 2 stazioni si sono sostituiti i valori grezzi di SCIA con quelli di ATLANTE e OMIRL, evidenziati in verde nella colonna “dato finale”.

Tabella 5.2 - Confronto per le 7 stazioni della Liguria dei record pluviometrici italiani dei dati SCIA-OMIRL-ATLANTE

STAZIONE	DATA EVENTO	DATO RECORD [mm]	DATO SCIA [mm]	DATO OMIRL [mm]	DATO ATLANTE [mm]	DATO FINALE [mm]
Genova Bolzaneto (GE)	08/10/1970	948.4	NA	-	-	NA
Valleregia (GE)	08/10/1970	932.6	NA	-	-	NA
Pontedecimo (GE)	08/10/1970	749.2	487	-	-	487
Monte Cappellino (GE)	08/10/1970	732	NA	-	535.6	535.6
Madonna della Guardia (GE)	07/10/1970	580	472.8	-	-	472.8
Brugnato (SP)	25/10/2011	539	NA	538.2	-	538.2
Rossiglione (GE)	04/11/2011	500	NA	375.2	-	375.2

Si riporta a titolo d’esempio il caso della stazione pluviometrica di Brugnato (SP), dove inizialmente nel database era presente il dato grezzo proveniente da SCIA per il giorno 25/10/2011, dopo la verifica in OMIRL, è stato possibile sostituire il valore ‘NA’ con il valore ‘538.2’ di OMIRL (Figura 5.5), circa uguale al valore ‘539’ riportato nel report.

Stazione	BRUGNATO
22/10/2011	0.2
23/10/2011	0.2
24/10/2011	4.2
25/10/2011	538.2
26/10/2011	0.8
27/10/2011	0.4

Figura 5.5 - Dato grezzo SCIA, dato grezzo OMIRL e dato finale sostituito della stazione 8027 “Brugnato”

Conclusa questa operazione, per la seconda volta si sono impacchettati i dati ottenendo i relativi grafici delle serie storiche così modificate.

6. CARATTERIZZAZIONE SPAZIO - TEMPORALE DELLE MODALITA' DI MISURA

6.1 GEOLOCALIZZAZIONE DELLE STAZIONI NEL BACINO DEL PO

Nella Figure 6.1 e 6.2 si identificano le nuove stazioni del database Giornaliere (colore verde) e le stazioni già presenti nel database I²-RED (colore rosso).

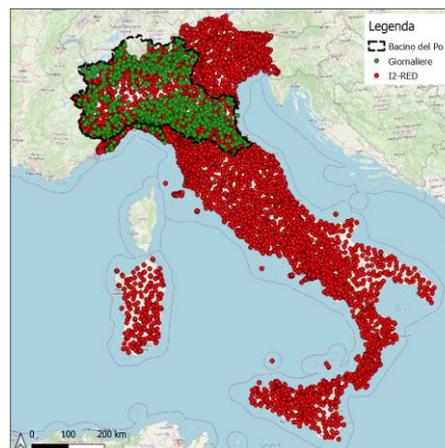


Figura 6.1 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Italia

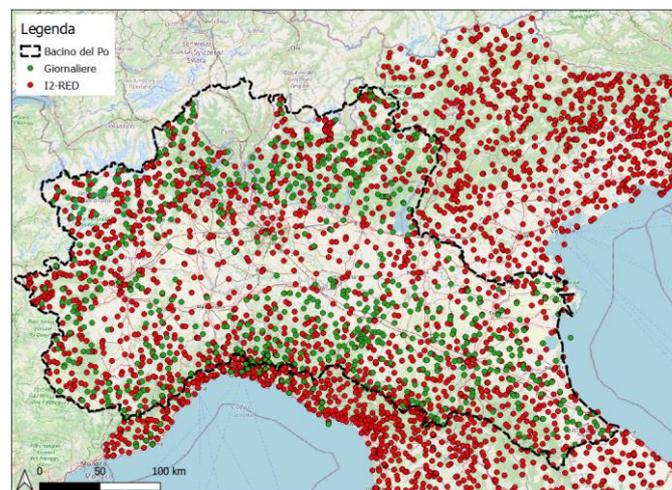


Figura 6.2 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche del bacino del Po

Nel database I²-RED in regione Piemonte sono censite 497 stazioni (ID 12000), di queste, con i dati reperiti dalle varie banche dati, nel nuovo database ne sono state trovate 465 e identificate ulteriori 168 (ID 112000).

Nel database I²-RED in regione Valle d'Aosta sono censite 74 stazioni (ID 20000), di queste, con i dati reperiti dalle varie banche dati, nel nuovo database ne sono state trovate 57 e identificate ulteriori 31 (ID 120000).

Nel database I²-RED in regione Liguria sono censite 273 stazioni (ID 8000), di queste, con i dati reperiti dalle varie banche dati, nel nuovo database ne sono state trovate 241 e identificate ulteriori 55 (ID 18000).

Nel database I²-RED in regione Lombardia sono censite 370 stazioni (ID 9000), di queste, con i dati reperiti dalle varie banche dati, nel nuovo database ne sono state trovate 218 e identificate ulteriori 174 (ID 19000).

Nel database I²-RED in regione Emilia-Romagna sono censite 403 stazioni (ID 5000), di queste, con i dati reperiti dalle varie banche dati, nel nuovo database ne sono state trovate 365 e identificate ulteriori 247 (ID 15000).

Nel Veneto, nelle Marche, in Toscana e nella Provincia Autonoma di Trento vengono esaminate solamente le stazioni che ricadono all'interno del bacino del Po.

Nel database I²-RED in regione Veneto sono censite 326 stazioni (ID 21000), di queste, con i dati reperiti dalle varie banche dati, nel nuovo database ne sono state trovate 30 e identificate ulteriori 16 (ID 121000).

Nel database I²-RED in regione Marche sono censite 191 stazioni (ID 10000), di queste, con i dati reperiti dalle varie banche dati, nel nuovo database ne sono state trovate 3 e identificate ulteriori 2 (ID 110000).

Nel database I²-RED in regione Toscana sono censite 554 stazioni (ID 16000), di queste, con i dati reperiti dalle varie banche dati, nel nuovo database ne sono state trovate 22 e identificate ulteriori 9 (ID 116000).

Nel database I²-RED nella Provincia Autonoma di Trento sono censite 105 stazioni (ID 17000), di queste, con i dati reperiti dalle varie banche dati, nel nuovo database ne sono state trovate 28 e identificate ulteriori 13 (ID 117000).

Nelle Figure da 6.3 a 6.7 si identificano le nuove stazioni del database Giornaliere (colore verde) e le stazioni già presenti nel database I²-RED (colore rosso).

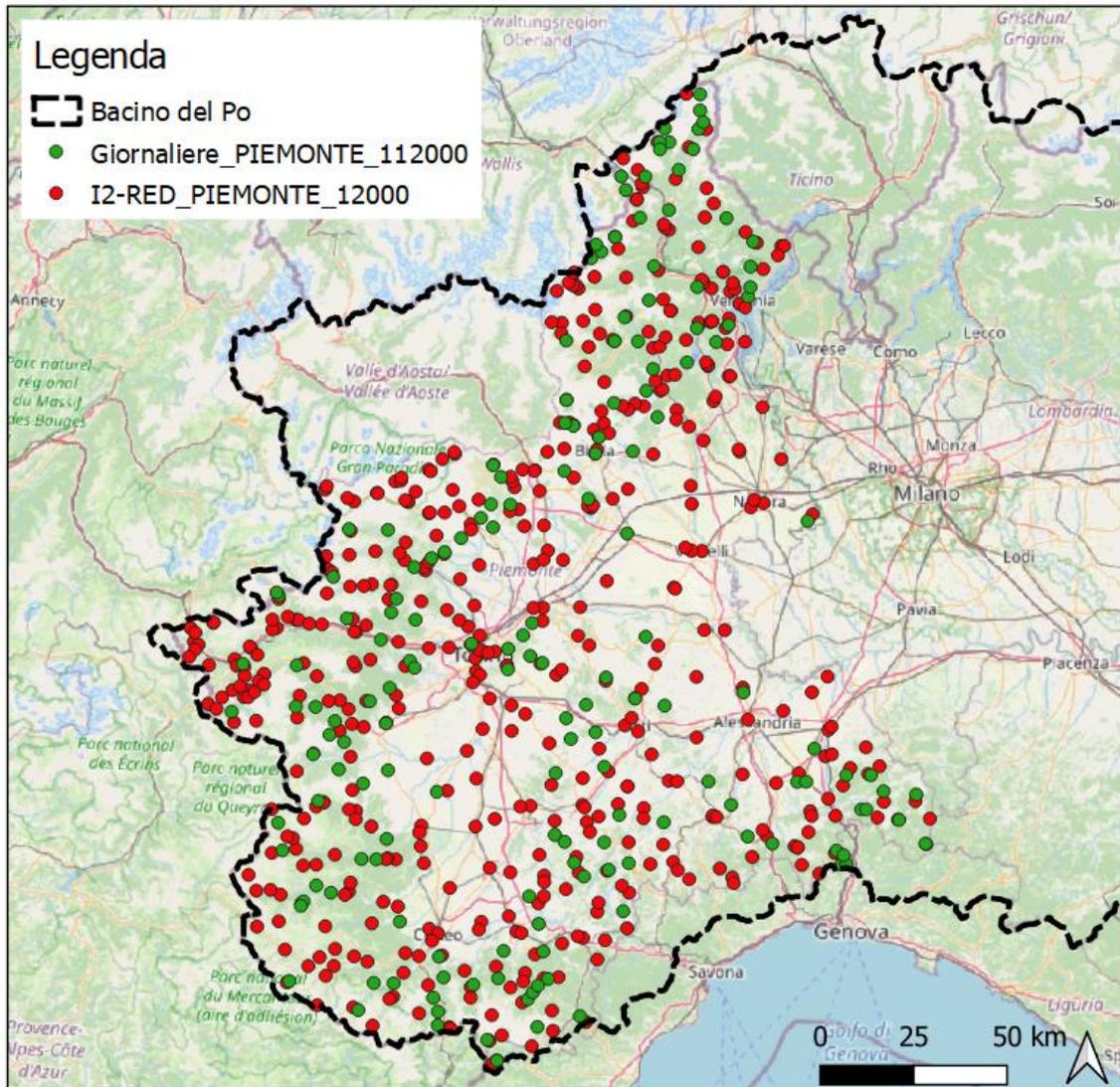


Figura 6.3 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Piemonte

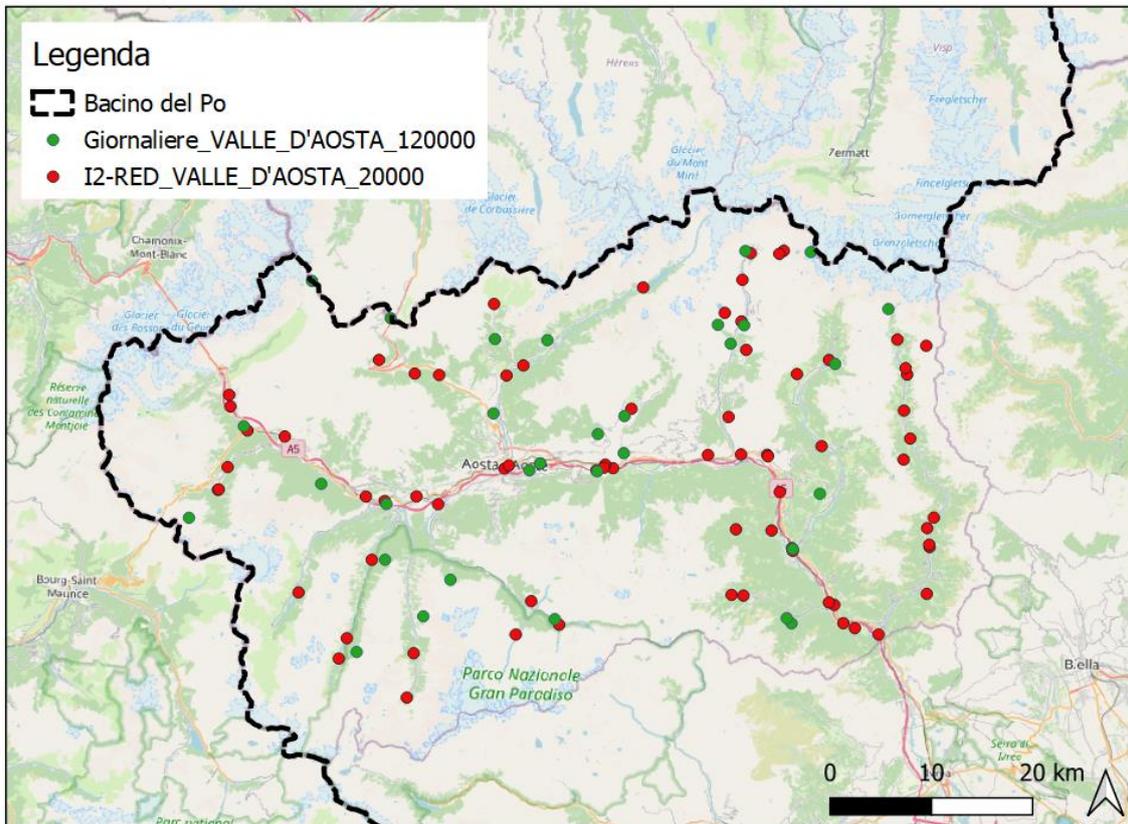


Figura 6.4 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Valle d'Aosta

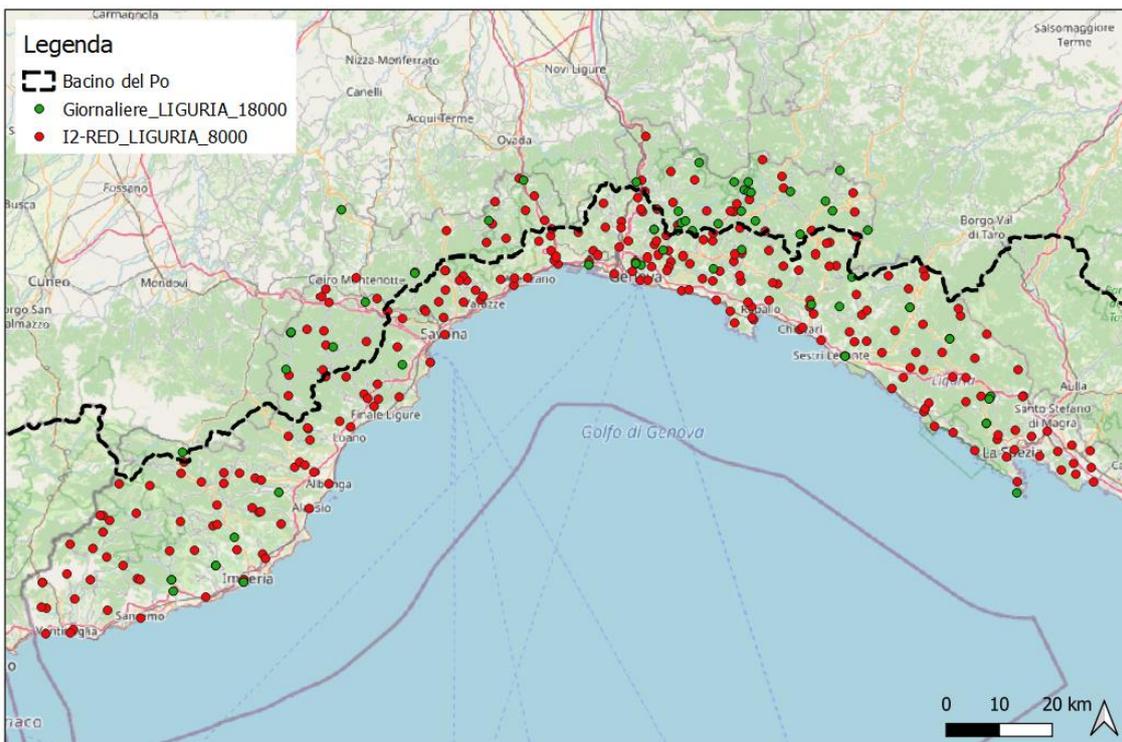


Figura 6.5 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Liguria

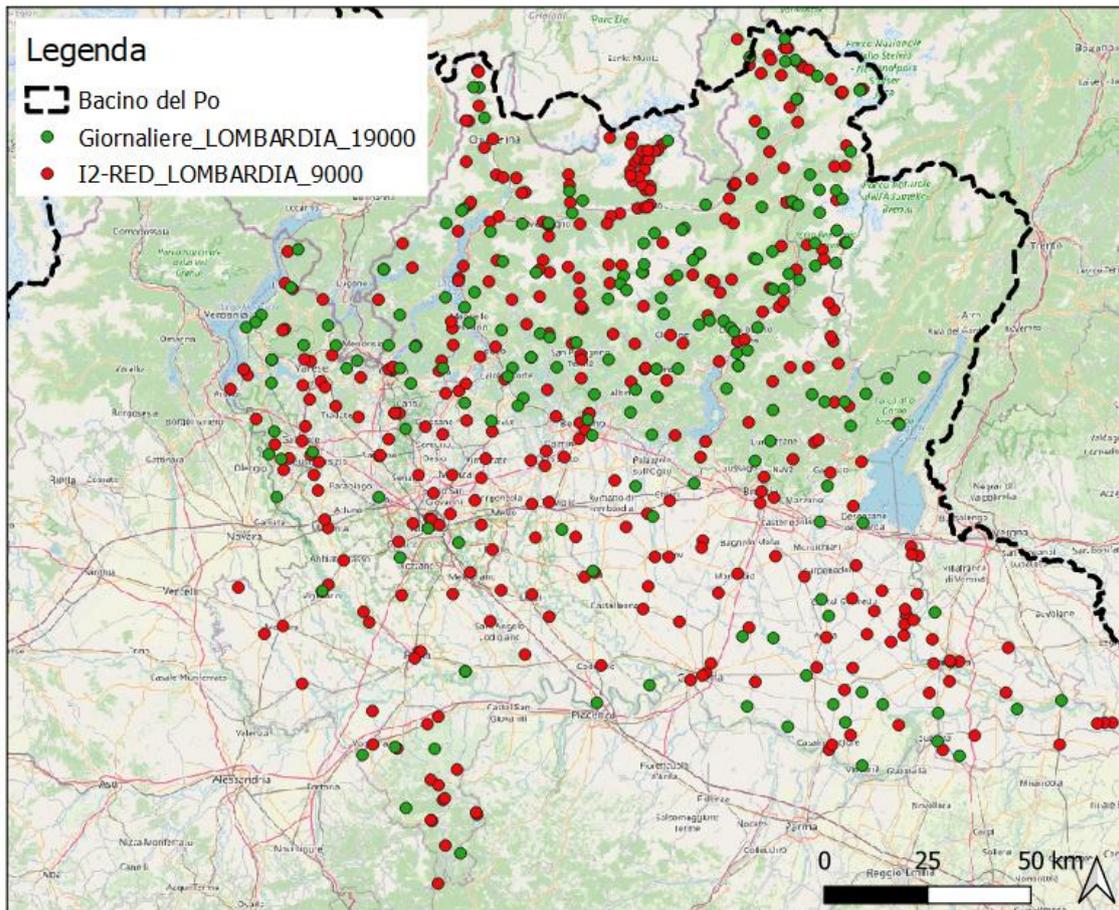


Figura 6.6 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Lombardia

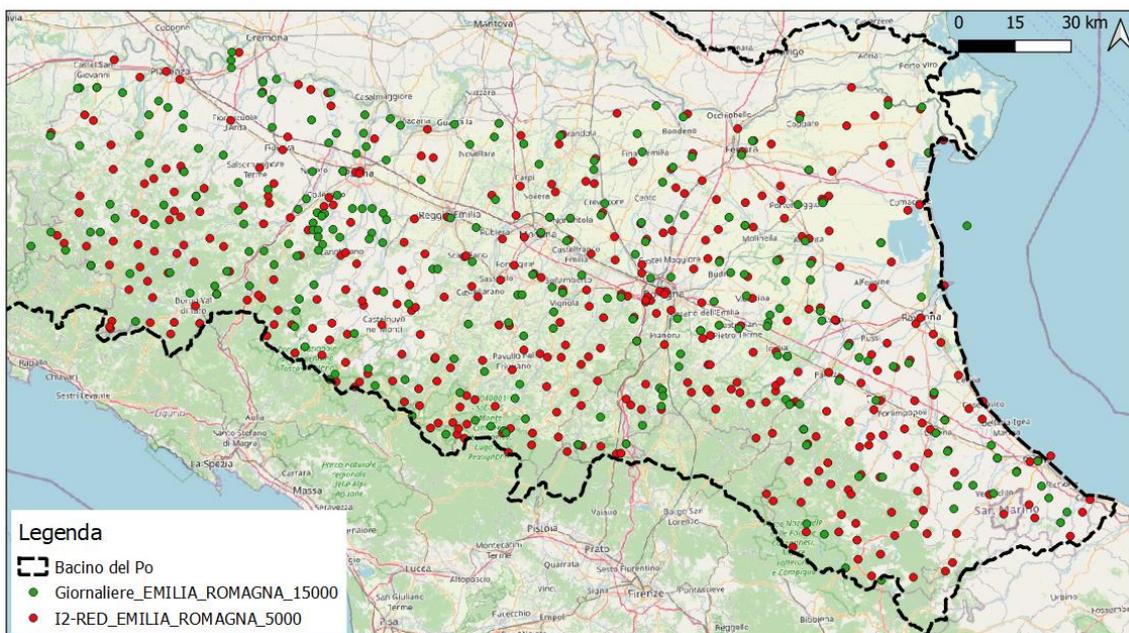


Figura 6.7 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Emilia-Romagna

Nella Figura 6.8 si identificano le stazioni già presenti nel database I²-RED (colore rosso) e le nuove stazioni del database Giornaliere del Veneto (colore blu), delle Marche (colore giallo), della Toscana (colore turchese), della Provincia Autonoma di Trento (colore rosa).

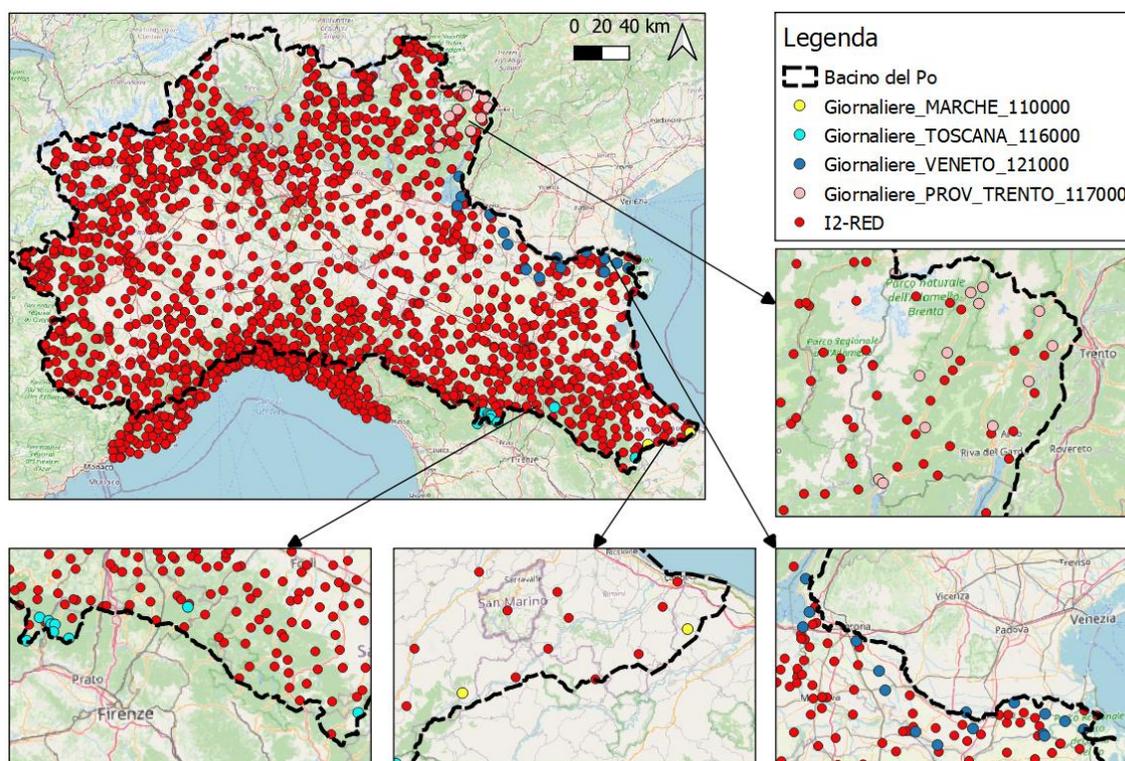


Figura 6.8 - Geolocalizzazione delle stazioni pluviometriche in Veneto, Marche, Toscana e Prov. Trento

6.2 STRUTTURA DEL DATABASE

Avendo a disposizione 2144 pluviometri, ognuno dei quali associato ad una serie storica di dati di precipitazione giornaliera, si è proceduto alla realizzazione del database delle precipitazioni giornaliere, strutturato in 5 colonne: la prima colonna contiene il codice identificativo della stazione pluviometrica, la seconda l'anno di misura, la terza il mese di misura, la quarta il giorno di misura e la quinta il valore di precipitazione misurato dal pluviometro [mm]; al termine di questa operazione si ha una matrice di dati di 25755453 righe per 5 colonne.

Si riporta in Figura 6.9, a titolo esemplificativo, una piccola parte del database Giornaliere dei valori giornalieri di precipitazione.

25755453x5 double

	1	2	3	4	5
26299	5003	1970	1	1	0
26300	5003	1970	1	2	0
26301	5003	1970	1	3	0
26302	5003	1970	1	4	1.4000
26303	5003	1970	1	5	1
26304	5003	1970	1	6	7
26305	5003	1970	1	7	5
26306	5003	1970	1	8	0.1120
26307	5003	1970	1	9	0.3180
26308	5003	1970	1	10	0.9820
26309	5003	1970	1	11	1.5180
26310	5003	1970	1	12	7.4320
26311	5003	1970	1	13	4.8300
26312	5003	1970	1	14	3.2620
26313	5003	1970	1	15	6.9920
26314	5003	1970	1	16	3.3300
26315	5003	1970	1	17	0
26316	5003	1970	1	18	0
26317	5003	1970	1	19	0
26318	5003	1970	1	20	0.1120
26319	5003	1970	1	21	0.0800
26320	5003	1970	1	22	0
26321	5003	1970	1	23	0
26322	5003	1970	1	24	1.2880
26323	5003	1970	1	25	0.9200
26324	5003	1970	1	26	0.1120
26325	5003	1970	1	27	0.0800
26326	5003	1970	1	28	0.9380
26327	5003	1970	1	29	2.1820
26328	5003	1970	1	30	4.5800
26329	5003	1970	1	31	6
26330	5003	1970	2	1	2.6120
26331	5003	1970	2	2	0.0800

Figura 6.9 - Primi valori del database delle misure di precipitazioni giornaliere

Si è proceduto alla realizzazione di una matrice di 3 colonne che contenesse informazioni spaziali delle stazioni pluviometriche: la prima colonna include il codice identificativo della stazione pluviometrica, la seconda la coordinata X e la terza la coordinata Y.

Si riporta in Figura 6.10, a titolo esemplificativo, una piccola parte delle coordinate delle stazioni pluviometriche.

2144x3 double

	1	2	3
1	5002	5.5558e+05	4.9217e+06
2	5003	7.1014e+05	4.9474e+06
3	5004	7.4206e+05	4.9311e+06
4	5005	6.7328e+05	4.9385e+06
5	5006	5.3401e+05	4.9761e+06
6	5007	6.8610e+05	4.9458e+06
7	5008	7.2504e+05	4.9443e+06
8	5010	7.4027e+05	4.9266e+06
9	5011	6.8014e+05	4.9483e+06
10	5012	7.3812e+05	4.8580e+06
11	5013	6.2765e+05	4.9286e+06
12	5014	7.3040e+05	4.9463e+06
13	5015	5.5630e+05	4.9402e+06
14	5016	5.5813e+05	4.9425e+06
15	5018	7.0080e+05	4.9467e+06
16	5019	7.1496e+05	4.9697e+06
17	5020	6.6565e+05	4.9305e+06
18	5021	5.4982e+05	4.9284e+06
19	5022	6.4891e+05	4.9143e+06
20	5023	7.1846e+05	4.9498e+06
21	5024	5.7894e+05	4.9283e+06
22	5025	7.3636e+05	4.9850e+06
23	5026	7.5050e+05	4.8931e+06
24	5027	5.4764e+05	4.9591e+06
25	5028	7.3027e+05	4.9558e+06
26	5029	5.3872e+05	4.9695e+06
27	5030	5.3040e+05	4.9558e+06
28	5031	6.8652e+05	4.9301e+06
29	5032	6.8689e+05	4.9300e+06
30	5033	6.8278e+05	4.9276e+06
31	5034	6.8513e+05	4.9301e+06
32	5036	6.5767e+05	4.8976e+06
33	5037	5.6244e+05	4.9515e+06

Figura 6.10 - Primi valori del database delle coordinate X e Y

La struttura del database termina con la costruzione dell'anagrafica, una matrice di 7 colonne, strutturata come quella del database I²-RED, contenente nella prima colonna codice identificativo ID della stazione pluviometrica, nella seconda il nome, nella terza e quarta valori "NaN" (tali colonne possono essere utilizzate in una successiva fase per l'inserimento delle coordinate in WGS 84), nella quinta la quota, nella sesta la coordinata X e nella settima la coordinata Y.

Si riporta in Figura 6.11, a titolo esemplificativo, una piccola parte dell'anagrafica delle stazioni pluviometriche del nuovo database Giornaliere del bacino del Po.

2144x7 cell

	1	2	3	4	5	6	7
1	5002	"Albareto"	"NaN"	"NaN"	495	5.5558e+05	4.9217e+06
2	5003	"Alberino"	"NaN"	"NaN"	11	7.1014e+05	4.9474e+06
3	5004	"Alfonsine"	"NaN"	"NaN"	5	7.4206e+05	4.9311e+06
4	5005	"Anzola_D...	"NaN"	"NaN"	42	6.7328e+05	4.9385e+06
5	5006	"Arcello"	"NaN"	"NaN"	410	5.3401e+05	4.9761e+06
6	5007	"Argelato"	"NaN"	"NaN"	25	6.8610e+05	4.9458e+06
7	5008	"Argenta"	"NaN"	"NaN"	4	7.2504e+05	4.9443e+06
8	5010	"Bagnacav...	"NaN"	"NaN"	4	7.4027e+05	4.9266e+06
9	5011	"Bagno_Di...	"NaN"	"NaN"	30	6.8014e+05	4.9483e+06
10	5012	"Bagno_Di...	"NaN"	"NaN"	470	7.3812e+05	4.8580e+06
11	5013	"Baiso"	"NaN"	"NaN"	550	6.2765e+05	4.9286e+06
12	5014	"Bando"	"NaN"	"NaN"	3	7.3040e+05	4.9463e+06
13	5015	"Bardi_Cen...	"NaN"	"NaN"	441	5.5630e+05	4.9402e+06
14	5016	"Bardi_Scu...	"NaN"	"NaN"	597	5.5813e+05	4.9425e+06
15	5018	"Baricella"	"NaN"	"NaN"	11	7.0080e+05	4.9467e+06
16	5019	"Baura"	"NaN"	"NaN"	8	7.1496e+05	4.9697e+06
17	5020	"Bazzano"	"NaN"	"NaN"	80	6.6565e+05	4.9305e+06
18	5021	"Bedonia"	"NaN"	"NaN"	521	5.4982e+05	4.9284e+06
19	5022	"Benedello...	"NaN"	"NaN"	604	6.4891e+05	4.9143e+06
20	5023	"Benvignan...	"NaN"	"NaN"	2	7.1846e+05	4.9498e+06
21	5024	"Berceto"	"NaN"	"NaN"	811	5.7894e+05	4.9283e+06
22	5025	"Berra"	"NaN"	"NaN"	0	7.3636e+05	4.9850e+06
23	5026	"Bertinoro"	"NaN"	"NaN"	257	7.5050e+05	4.8931e+06
24	5027	"Bettola"	"NaN"	"NaN"	329	5.4764e+05	4.9591e+06
25	5028	"Bevilacqua"	"NaN"	"NaN"	1	7.3027e+05	4.9558e+06
26	5029	"Bobbiano"	"NaN"	"NaN"	552	5.3872e+05	4.9695e+06
27	5030	"Bobbio"	"NaN"	"NaN"	270	5.3040e+05	4.9558e+06
28	5031	"Bologna_I...	"NaN"	"NaN"	84	6.8652e+05	4.9301e+06
29	5032	"Bologna_...	"NaN"	"NaN"	52	6.8689e+05	4.9300e+06
30	5033	"Bologna_...	"NaN"	"NaN"	286	6.8278e+05	4.9276e+06
31	5034	"Bologna_...	"NaN"	"NaN"	48	6.8513e+05	4.9301e+06
32	5036	"Bombiana"	"NaN"	"NaN"	804	6.5767e+05	4.8976e+06
33	5037	"Bore"	"NaN"	"NaN"	800	5.6244e+05	4.9515e+06

Figura 6.11 - Primi valori dell'anagrafica del database

I dati sono stati salvati in formato mat e csv.

6.3 CARATTERISTICHE DEL DATABASE

Il database Giornaliere consta di 2144 stazioni pluviometriche così distribuite all'interno del bacino del Po (Figura 6.12):

- 633 pluviometri in Piemonte;
- 88 pluviometri in Valle d'Aosta;
- 296 pluviometri in Liguria;
- 392 pluviometri in Lombardia;
- 612 pluviometri in Emilia-Romagna;
- 46 pluviometri in Veneto;
- 5 pluviometri nelle Marche;
- 31 pluviometri in Toscana;
- 41 pluviometri nella Provincia Autonoma di Trento.

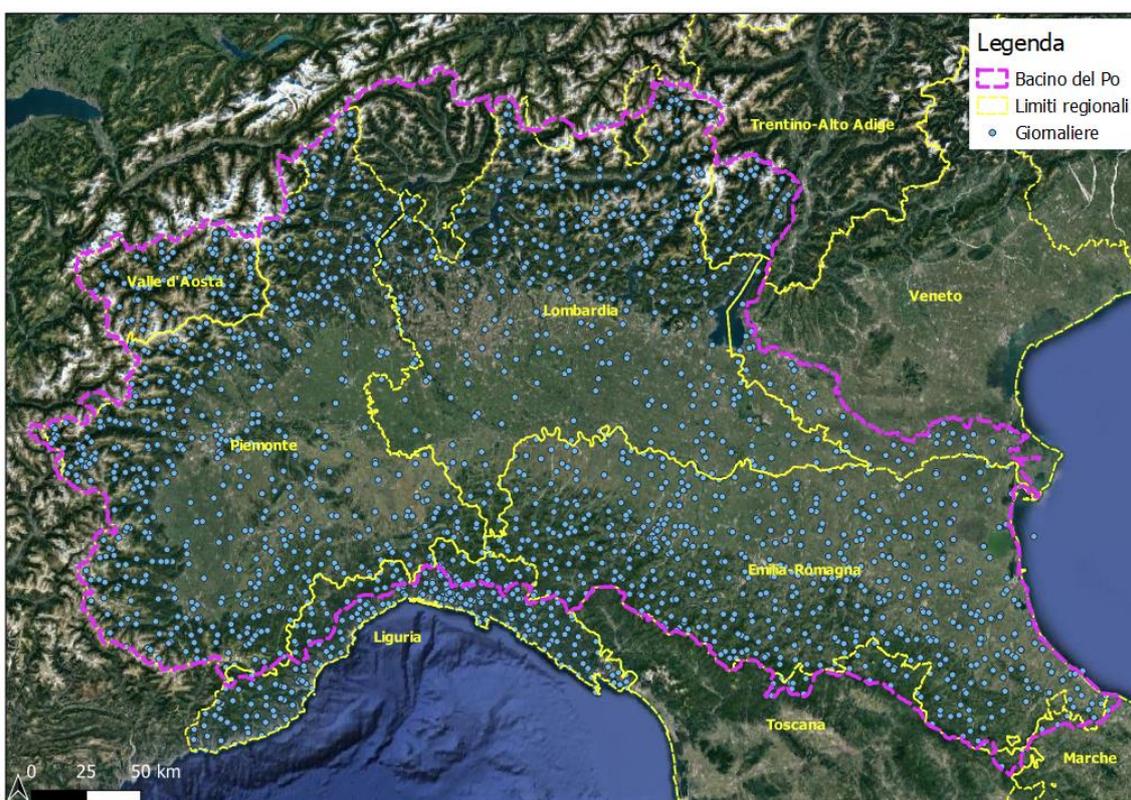
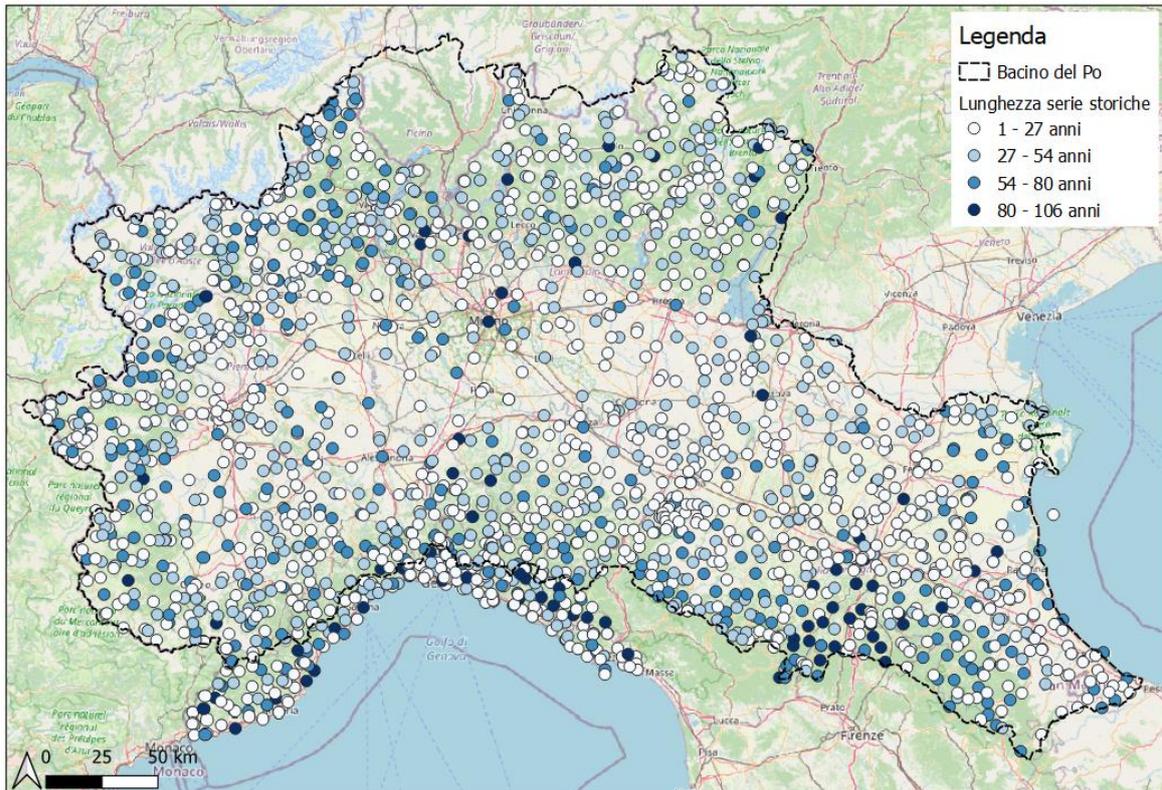


Figura 6.12 - Distribuzione spaziale delle stazioni pluviometriche del database

Le serie storiche di cui è costituito il database hanno una lunghezza media di poco superiore a 30 anni, lunghezza minima di 1 anno e lunghezza massima di 106 anni (Figura 6.13).



*Figura 6.13 - Distribuzione spaziale delle serie temporali dei pluviometri.
Il colore si riferisce alla lunghezza delle serie storiche.*

Il 40.9 % delle serie storiche prese in considerazione ha una lunghezza di anni superiore alla media e il restante 59.1 % ha una lunghezza di anni inferiore alla media.

Sebbene il database sia costituito di 2144 pluviometri, solo 897 di questi sono caratterizzati da una serie temporale di almeno 30 anni, che è la lunghezza standard per le analisi climatologiche.

Un'ulteriore considerazione è rivolta solamente alle stazioni non incluse nel database I²-RED, che presentano una lunghezza media di poco superiore a 27 anni, lunghezza minima di 1 anno e lunghezza massima di 99 anni (Figura 6.14).

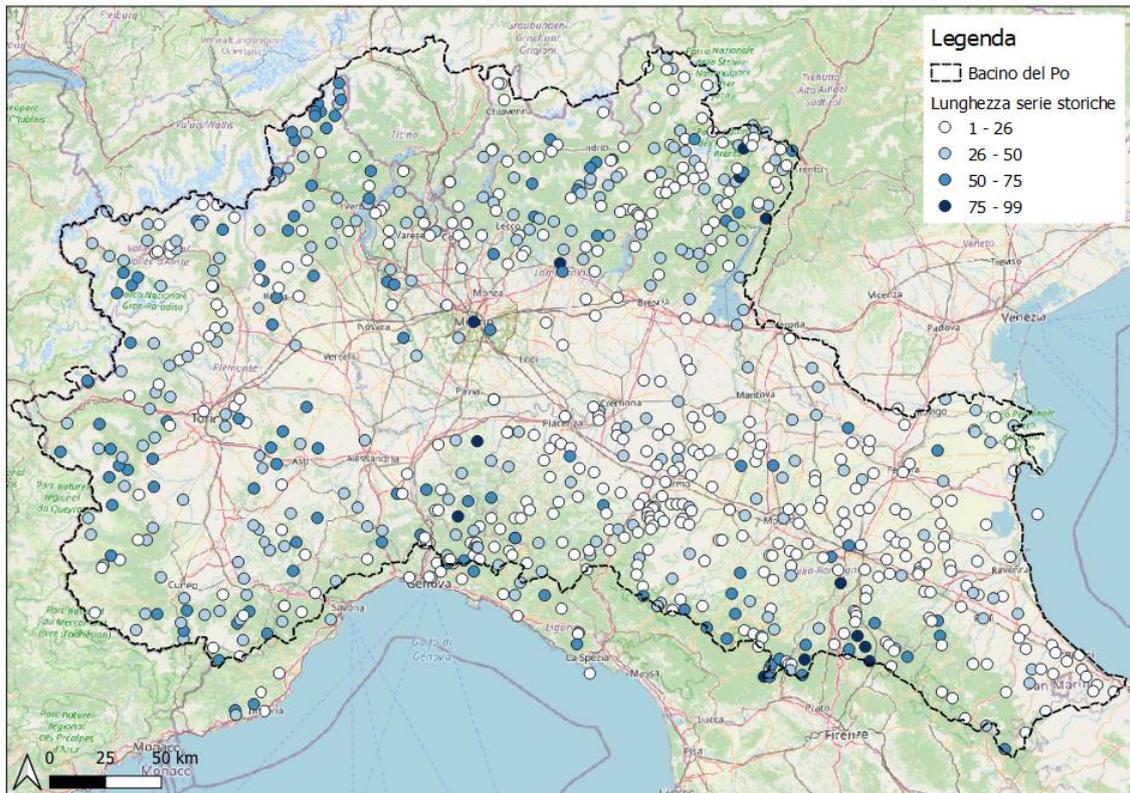


Figura 6.14 - Distribuzione spaziale delle serie temporali dei pluviometri non inclusi nel database "I²-RED". Il colore si riferisce alla lunghezza delle serie storiche.

Nelle Figure 6.15 e 6.16 si rappresentano rispettivamente la distribuzione di frequenza e spaziale delle quote delle stazioni pluviometriche contenute nel database Giornaliere. Dal grafico è possibile osservare che l'80.3 % delle stazioni si trova sotto i 1000 metri di quota, rendendo quindi le località a quota maggiore meno campionate.

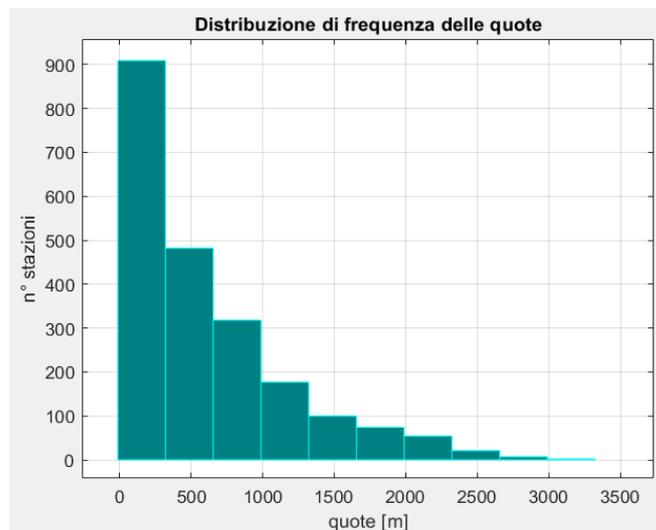


Figura 6.15 - Distribuzione di frequenza delle quote delle stazioni pluviometriche

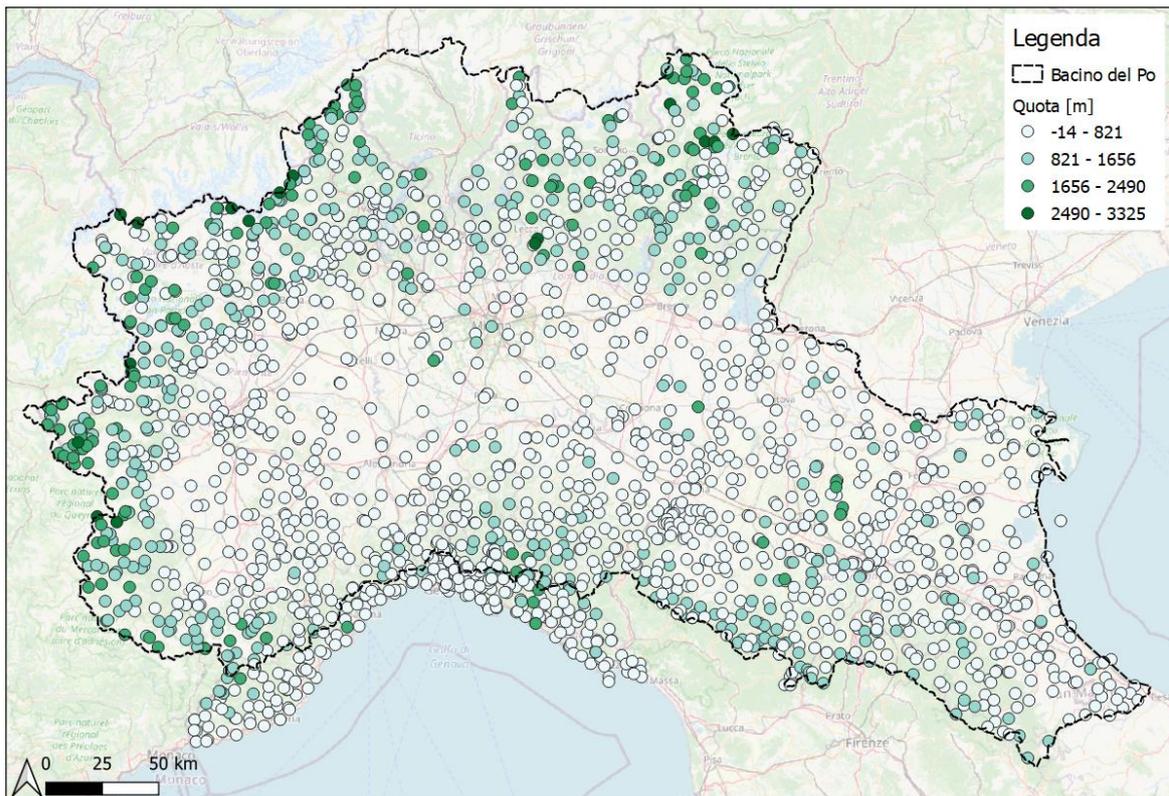


Figura 6.16 - Distribuzione spaziale delle quote delle stazioni pluviometriche

6.3.1 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLE STAZIONI PLUVIOMETRICHE

Le stazioni pluviometriche hanno avuto un andamento irregolare nel tempo (Figura 6.17).

Dalle prime poche stazioni del 1910, si evince un aumento del numero dei pluviometri fino alla Seconda guerra mondiale che vede una scontata drastica riduzione degli stessi, per poi risalire dal 1946 e raggiungere il picco nel 1958, con andamento quasi costante fino agli ultimi anni. Dal 1996 al 2000 irrompe l'effetto dello smantellamento del SIMN: non tutte le regioni aggiornarono o ripararono le vecchie stazioni in tempi stretti; pertanto, la maggior parte dei vecchi pluviometri meccanici a bascula fu nel tempo sostituita da quelli automatici. Infine, per gli anni più recenti si nota un ulteriore decremento del numero dei dati, attribuibile alla mancata comunicazione da parte delle regioni.

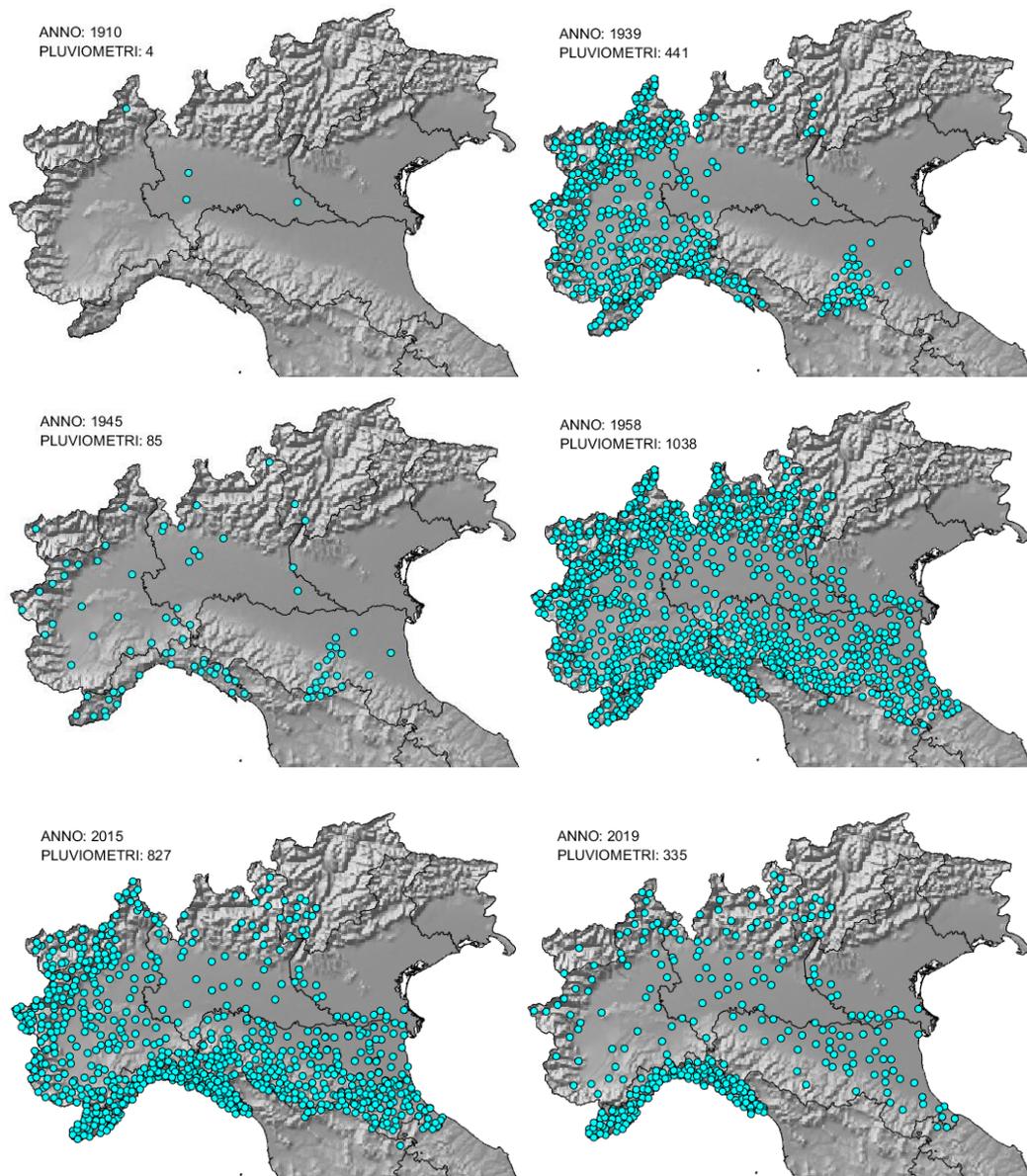


Figura 6.17 - Variazione spaziale e temporale del numero di stazioni pluviometriche nel bacino del Po

6.3.2 CONFRONTO TRA DATABASE Giornaliere E DATABASE I²-RED

Si riporta in Figura 6.18 il numero di stazioni incluse nei due database anno per anno, solamente per le regioni del bacino del Po; la linea verde si riferisce al nuovo database delle precipitazioni massime annuali giornaliere del bacino del Po, Giornaliere, mentre la linea rossa si riferisce al database di precipitazioni massime, I²-RED.

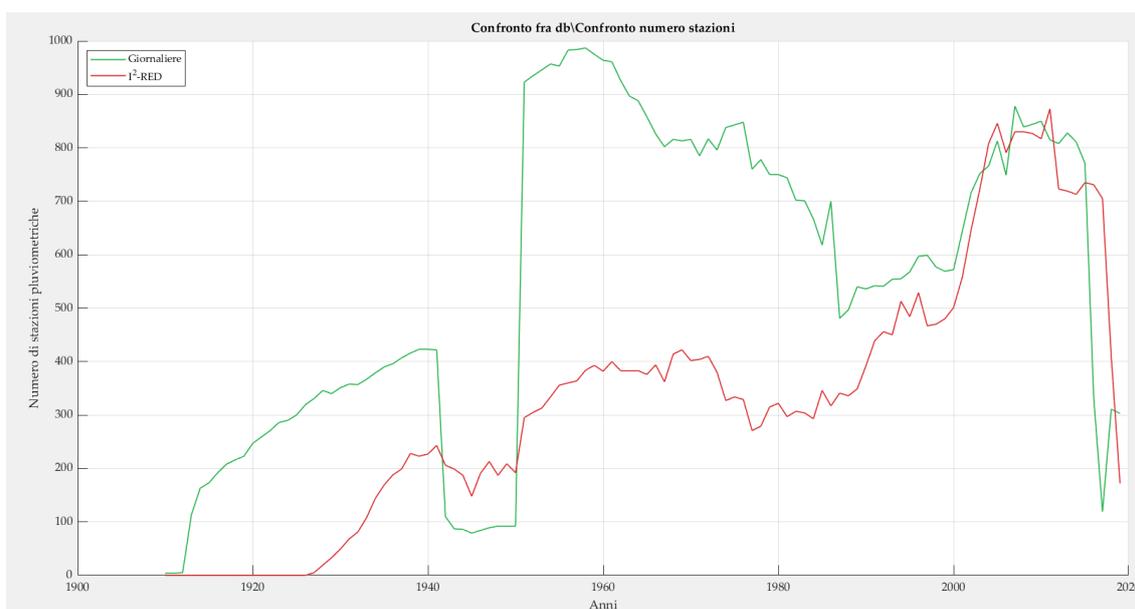


Figura 6.18 - Confronto del numero di stazioni dei due database anno per anno

I due database seguono un andamento simile, mostrando tendenze di crescita e decrescita negli stessi periodi.

Dai grafici ottenuti per le singole regioni (Figura 6.19), si evince come l'informazione vari da regione a regione. Nel nuovo database si osserva un decremento di dati riferiti all'anno 2017 per il Piemonte e la Liguria, e dal 2017 per la Valle d'Aosta, molto probabilmente attribuibile alla disponibilità di una sola fonte dati, archivio SCIA, per questi ultimi anni.

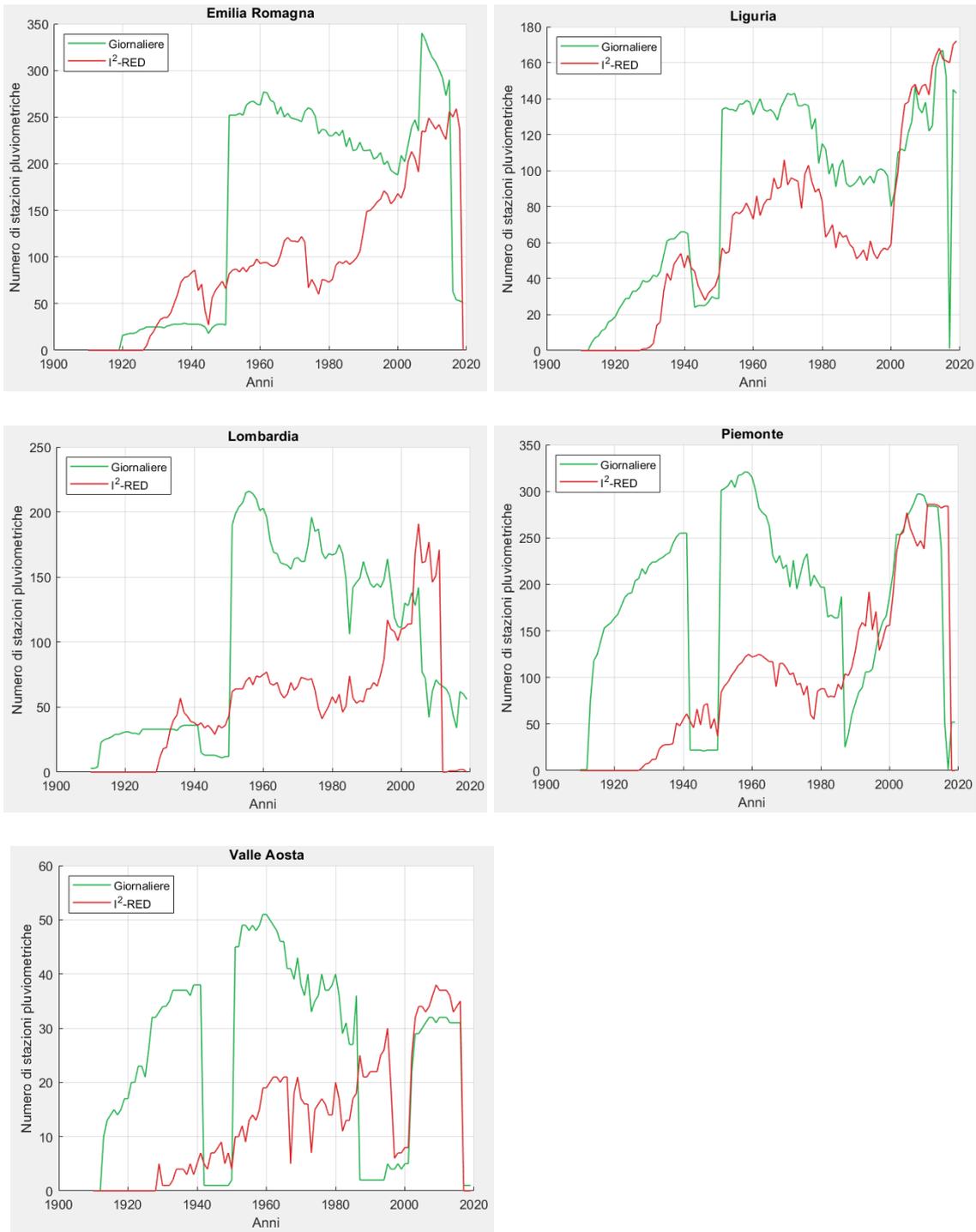


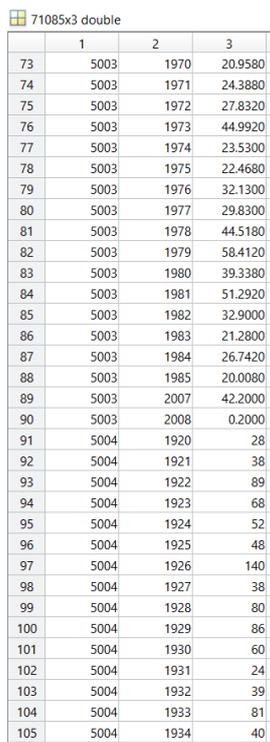
Figura 6.19 - Confronto del numero di stazioni dei due database anno per anno per regione

7. STATISTICHE DESCRITTIVE DEI MASSIMI ANNI DI PIOGGIA GIORNALIERA

7.1 CALCOLO DEL MASSIMO ANNUO DI PRECIPITAZIONE

Con un successivo script di Matlab si è calcolato per ogni stazione e per ogni anno delle serie storiche disponibili il valore massimo di precipitazione, ottenendo una matrice di dati strutturata in 3 colonne: la prima colonna contiene il codice identificativo della stazione pluviometrica, la seconda l'anno di misura, la terza il valore massimo di precipitazione registrato dal pluviometro; le dimensioni risultano pari a 71085 righe per 3 colonne.

Si riporta in Figura 7.1, a titolo esemplificativo, una piccola parte del database dei valori massimi annui di precipitazione.



	1	2	3
73	5003	1970	20.9580
74	5003	1971	24.3880
75	5003	1972	27.8320
76	5003	1973	44.9920
77	5003	1974	23.5300
78	5003	1975	22.4680
79	5003	1976	32.1300
80	5003	1977	29.8300
81	5003	1978	44.5180
82	5003	1979	58.4120
83	5003	1980	39.3380
84	5003	1981	51.2920
85	5003	1982	32.9000
86	5003	1983	21.2800
87	5003	1984	26.7420
88	5003	1985	20.0080
89	5003	2007	42.2000
90	5003	2008	0.2000
91	5004	1920	28
92	5004	1921	38
93	5004	1922	89
94	5004	1923	68
95	5004	1924	52
96	5004	1925	48
97	5004	1926	140
98	5004	1927	38
99	5004	1928	80
100	5004	1929	86
101	5004	1930	60
102	5004	1931	24
103	5004	1932	39
104	5004	1933	81
105	5004	1934	40

Figura 7.1 - Valori del database delle misure di massimi annui di precipitazione

Non tutte le serie storiche delle singole stazioni sono costituite da anni completi di misurazione, in quanto il periodo di misurazione di ogni singolo anno varia di stazione in stazione. Per tener conto della veridicità del massimo trovato e per poter accettare o meno il massimo calcolato anche delle serie storiche con meno di 365 giorni di misura effettiva, si è implementato un meccanismo “Calendario – correlazione spaziale”: per prima cosa si identificano le stazioni con misurazioni effettuate in tutto l’anno, di seguito stazioni ‘complete’, e le stazioni con misurazioni non effettuate per l’intero anno, di seguito stazioni ‘incomplete’ o ‘interrotte’. Per ogni stazione ‘incompleta’ si cerca la stazione più vicina ad essa che sia completa, per confrontare la data del massimo valore di precipitazione della stazione ‘completa’ con quella ‘incompleta’:

- ❖ se alla data del massimo della stazione ‘completa’ è stata effettuata una misurazione anche dalla stazione ‘incompleta’, allora si può ritenere la serie annuale della stazione ‘incompleta’ attendibile, in quanto presumibilmente il massimo registrato dalla stazione vicina e ‘completa’ sarà stato registrato nello stesso giorno anche dalla stazione ‘incompleta’;
- ❖ se alla data del massimo della stazione ‘completa’ non è stata effettuata una misurazione dalla stazione ‘incompleta’, allora non si può ritenere la serie annuale della stazione ‘incompleta’ attendibile, in quanto presumibilmente il massimo ricadrà in questo giorno nel quale non risulta una misurazione; quindi, il massimo della stazione ‘incompleta’ calcolato precedentemente non è rappresentativo dell’intero anno, ma solo del periodo effettivo di misura.

Queste considerazioni, implementate in un nuovo codice su Matlab, portano ad ottenere una matrice di dati contenente il valore massimo attendibile di ogni stazione pluviometrica per ogni anno di misura, considerando il periodo di interruzione per le stazioni ‘incomplete’, se influente (il periodo di interruzione comprende la data del massimo di precipitazione registrato dalla stazione vicina ‘completa’) o ininfluente (il periodo di interruzione non comprende la data del massimo di precipitazione registrato dalla stazione vicina ‘completa’).

Delle 2144 stazioni pluviometriche risultano 1277 ‘complete’ e 867 ‘incomplete’; in Figura 7.2 è mostrata una porzione di risultato proiettata a video nella Command Window di Matlab degli anni incompleti stazione per stazione.

```

Command Window
anno 1985 incompleto per la stazione 5003
anno 2008 incompleto per la stazione 5003
anno 1935 incompleto per la stazione 5005
anno 1996 incompleto per la stazione 5022
anno 1957 incompleto per la stazione 5026
anno 1934 incompleto per la stazione 5031
anno 1924 incompleto per la stazione 5036
anno 1992 incompleto per la stazione 5039
anno 2001 incompleto per la stazione 5048
anno 1996 incompleto per la stazione 5050
anno 2001 incompleto per la stazione 5059
anno 2018 incompleto per la stazione 5059
anno 2004 incompleto per la stazione 5063
anno 2008 incompleto per la stazione 5070
anno 1933 incompleto per la stazione 5071
anno 1920 incompleto per la stazione 5072
anno 2004 incompleto per la stazione 5074
anno 2007 incompleto per la stazione 5078
anno 2004 incompleto per la stazione 5079
anno 2008 incompleto per la stazione 5082
anno 2013 incompleto per la stazione 5085
anno 2010 incompleto per la stazione 5087
anno 1937 incompleto per la stazione 5103
anno 2004 incompleto per la stazione 5104
anno 1984 incompleto per la stazione 5112
fx anno 2002 incompleto per la stazione 5112

```

Figura 7.2 - Prime stazioni pluviometriche 'incomplete' nella Command Window di Matlab

Emergono 1935 anni di misurazioni incomplete, di cui 671 massimi calcolati non attendibili; in Figura 7.3 è riportata una parte di risultato mostrata a video nella Command Window di Matlab.

```

Command Window
anno 1985 incompleto per la stazione 5003, dato NON attendibile
anno 2008 incompleto per la stazione 5003, dato NON attendibile
anno 1935 incompleto per la stazione 5005, ma dato attendibile: OK
anno 1996 incompleto per la stazione 5022, ma dato attendibile: OK
anno 1957 incompleto per la stazione 5026, ma dato attendibile: OK
anno 1934 incompleto per la stazione 5031, ma dato attendibile: OK
anno 1924 incompleto per la stazione 5036, dato NON attendibile
anno 1992 incompleto per la stazione 5039, ma dato attendibile: OK
anno 2001 incompleto per la stazione 5048, dato NON attendibile
anno 1996 incompleto per la stazione 5050, ma dato attendibile: OK
anno 2001 incompleto per la stazione 5059, ma dato attendibile: OK
anno 2018 incompleto per la stazione 5059, dato NON attendibile
anno 2004 incompleto per la stazione 5063, ma dato attendibile: OK
anno 2008 incompleto per la stazione 5070, ma dato attendibile: OK
anno 1933 incompleto per la stazione 5071, ma dato attendibile: OK
anno 1920 incompleto per la stazione 5072, ma dato attendibile: OK
anno 2004 incompleto per la stazione 5074, dato NON attendibile
anno 2007 incompleto per la stazione 5078, dato NON attendibile
anno 2004 incompleto per la stazione 5079, ma dato attendibile: OK
anno 2008 incompleto per la stazione 5082, ma dato attendibile: OK
anno 2013 incompleto per la stazione 5085, ma dato attendibile: OK
anno 2010 incompleto per la stazione 5087, dato NON attendibile
anno 1937 incompleto per la stazione 5103, dato NON attendibile
anno 2004 incompleto per la stazione 5104, dato NON attendibile
anno 1984 incompleto per la stazione 5112, ma dato attendibile: OK
fx anno 1960 incompleto per la stazione 5119, ma dato attendibile: OK

```

Figura 7.3 - Serie annuali attendibili/non attendibili nella Command Window di Matlab

L'output finale della matrice dei massimi di precipitazione per ogni pluviometro e per ogni anno consta di 70414 righe per 3 colonne.

Si riporta in Figura 7.4, a titolo esemplificativo, una piccola parte del database dei valori massimi annui di precipitazione.

70414x3 double

	1	2	3
73	5003	1970	20.9580
74	5003	1971	24.3880
75	5003	1972	27.8320
76	5003	1973	44.9920
77	5003	1974	23.5300
78	5003	1975	22.4680
79	5003	1976	32.1300
80	5003	1977	29.8300
81	5003	1978	44.5180
82	5003	1979	58.4120
83	5003	1980	39.3380
84	5003	1981	51.2920
85	5003	1982	32.9000
86	5003	1983	21.2800
87	5003	1984	26.7420
88	5003	2007	42.2000
89	5004	1920	28
90	5004	1921	38
91	5004	1922	89
92	5004	1923	68
93	5004	1924	52
94	5004	1925	48
95	5004	1926	140
96	5004	1927	38
97	5004	1928	80
98	5004	1929	86
99	5004	1930	60
100	5004	1931	24
101	5004	1932	39
102	5004	1933	81
103	5004	1934	40
104	5004	1935	53
105	5004	1936	62.4000

Figura 7.4 - Valori del database delle misure di massimi annui di precipitazione

7.2 STATISTICHE DESCRITTIVE E CONTROLLO QUALITA'

Nelle procedure di analisi di frequenza locale e regionale i momenti ordinari, in particolare media, scarto quadratico medio, skewness e kurtosis, sono spesso impiegati per la stima dei parametri delle distribuzioni di probabilità. Hosking (1990) e Hosking e Wallis (1997) proposero l'utilizzo degli L-momenti in sostituzione di quelli ordinari in quanto atti a rappresentare un maggior numero di distribuzioni, più robusti nella stima, anche in presenza di pochi dati e di outliers, e meno soggetti a distorsione nella stima.

7.2.1 MOMENTI ORDINARI

La forma di una distribuzione di probabilità è tradizionalmente descritta attraverso i momenti della distribuzione. Considerando la variabile aleatoria X a valori reali e la sua funzione di densità di probabilità $f(x)$, il valore atteso di X è definito come:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad (7.1)$$

Il momento di ordine primo è rappresentato dal valore atteso, la media:

$$\mu = E(X) \quad (7.2)$$

mentre i momenti di ordine superiore sono definiti come:

$$\mu_r = E(X - \mu)^r \quad \text{con } r = 2, 3, \dots \quad (7.3)$$

La media definisce il baricentro della distribuzione.

La mediana è il valore centrale in una serie di dati ordinati, che divide un campione di dati ordinati in due parti ugualmente numerose: metà dei valori nel campione è più piccola della mediana e metà è più grande; è una misura della tendenza centrale.

La dispersione della distribuzione intorno alla media può essere misurata con la deviazione standard (7.4) o con la varianza (7.5).

$$\sigma = \mu_2^{1/2} = \{E(X - \mu)^2\}^{1/2} \quad (7.4)$$

$$\sigma^2 = \text{var}(X) \quad (7.5)$$

7.2.2 MOMENTI ORDINARI ADIMENSIONALI

Per confrontare campioni di natura diversa o provenienti da stazioni diverse, generalmente si utilizzano i momenti ordinari adimensionali.

Il coefficiente di variazione (7.6) esprime la dispersione della distribuzione adimensionalizzata con la media.

$$C_v = \sigma/\mu \quad (7.6)$$

Per identificare la simmetria della distribuzione di probabilità rispetto alla media si calcola il coefficiente di asimmetria o skewness:

$$CA = \gamma = \mu_3/\sigma^3 \quad (7.7)$$

Valori di CA diversi da zero indicano che la distribuzione ha una coda e, in particolare, valori di CA positivi e negativi indicano che la coda è rispettivamente a destra e a sinistra. Solitamente le variabili casuali di natura idrologica hanno CA positivi: la coda della loro distribuzione di probabilità si trova a destra.

Si definisce inoltre il coefficiente di kurtosis:

$$K = \mu_4/\sigma^4 \quad (7.8)$$

7.2.3 MOMENTI PESATI IN PROBABILITA'

Gli L-momenti rappresentano un metodo alternativo per descrivere la forma delle distribuzioni di probabilità. Nascono come una modifica dei momenti pesati in probabilità (Probability Weighted Moments, PWM; Greenwood et al., 1979). Data una variabile aleatoria X con funzione probabilità di non superamento $F(X) = P[X \leq x]$, si definiscono i PWM come:

$$M_{p,r,s} = E[X^p \{F(X)\}^r \{1 - F(X)\}^s] \quad (7.9)$$

con p, r, s numeri reali. Casi particolari di momenti pesati in probabilità spesso usati sono $\alpha_r = M_{1,0,r}$ e $\beta_r = M_{1,r,0}$:

$$\alpha_r = \int_0^1 X \{1 - F(X)\}^r dF(x) \quad (7.10)$$

$$\beta_r = \int_0^1 X \{F(X)\}^r dF(x) \quad (7.11)$$

Le relazioni che intercorrono tra i momenti pesati in probabilità e i parametri di una distribuzione di probabilità hanno forma matematica più semplice di quelle che si hanno tra i momenti convenzionali e gli stessi parametri. Questi ultimi devono spesso essere ricavati mediante metodi iterativi mentre i PWM consentono di ricavare i parametri mediante semplici combinazioni lineari.

7.2.4 L-MOMENTI E L-MOMENTI ADIMENSIONALI

Gli L-momenti sono prodotti di combinazioni lineari dei momenti pesati in probabilità (PWM). Sono maggiormente utilizzati rispetto a questi ultimi perché risentono meno della variabilità campionaria e dalla distorsione dovuta all'elevamento a potenza; sono più facilmente interpretabili come misura della forma della distribuzione. La stima dei parametri di una distribuzione basata sui PWM e sugli L-momenti risulta robusta ed accurata, come dimostrato in passato in diverse applicazioni e studi. Gli L-momenti sono definiti da Hosking (1990) mediante combinazioni lineari:

$$\lambda_{r+1} = (-1)^r \sum_{k=0}^r p_{r,k}^* \alpha_k = \sum_{k=0}^r p_{r,k}^* \beta_k \quad (7.12)$$

dove $p_{r,k}^* = (-1)^{r-k} \binom{r}{k} \binom{r+k}{k} = \frac{(-1)^{r-k} (r+k)!}{(k!)^2 (r-k)!}$. Esplicitando gli L-momenti dei primi ordini in funzione dei PWM si ottiene:

$$\lambda_1 = \alpha_0 = \beta_0 \quad (7.13)$$

$$\lambda_2 = \alpha_0 - 2\alpha_1 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (7.14)$$

$$\lambda_3 = \alpha_0 - 6\alpha_1 + 6\alpha_2 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (7.15)$$

$$\lambda_4 = \alpha_0 - 12\alpha_1 + 30\alpha_2 - 20\alpha_3 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (7.16)$$

λ_1 è definito L-location, rappresenta la media della distribuzione, dunque una misura di tendenza centrale della distribuzione; λ_1 può assumere qualsiasi valore da $-\infty$ a $+\infty$.

λ_2 è definito L-scale, rappresenta una misura della variabilità della variabile casuale, dunque una misura di scala della distribuzione; in particolare $\lambda_2 \geq 0$.

Anche per gli L-momenti è possibile definire la corrispondente versione adimensionale: gli L-momenti adimensionali sono ottenuti dal rapporto tra gli L-momenti di ordine superiore e λ_2 :

$$\tau_r = \frac{\lambda_r}{\lambda_2}, r = 3, 4, \dots \quad (7.17)$$

Gli L-momenti soddisfano la disequazione $|\tau_r| < 1$ per $r \geq 3$. Questi rappresentano misure della forma di una distribuzione in maniera indipendente dalla sua scala di misura. Analogamente a quanto visto per i momenti convenzionali adimensionali, τ_3 prende il nome di L-skewness, mentre τ_4 viene detto L-kurtosis. Si definisce inoltre il coefficiente LCV:

$$\tau_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (7.18)$$

il cui significato è analogo a quello del coefficiente di variazione C_v . Per una distribuzione a valori positivi, vale che $0 \leq \tau_2 < 1$.

Gli L-momenti λ_1 e λ_2 , e gli L-momenti adimensionali LCV (τ_2), L-skewness o LCA (τ_3), L-kurtosis (τ_4), sono le grandezze più utilizzate per descrivere le distribuzioni di probabilità.

7.3 CALCOLO DELLE STATISTICHE DESCRITTIVE

Si sono calcolate le statistiche descrittive (media, deviazione standard, mediana, coefficiente di variazione, coefficiente di L-variazione e di L-asimmetria) del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione, per tutte le stazioni mediante uno script di Matlab, al fine di identificare eventuali e ulteriori errori nei dati che non sono stati rilevati nella fase di processamento. Ricavato un file .csv, creato lo shapefile relativo, importato su QGIS, si è visualizzata la distribuzione spaziale dei parametri per poter esaminare i valori. Delle 6 statistiche esaminate, la deviazione standard mostra alcune anomalie per determinati valori isolati, caratterizzati da un valore alto circondato da valori bassi; i punti cerchiati in Figura 7.5 indicano valori anomali, se paragonati con i valori limitrofi.

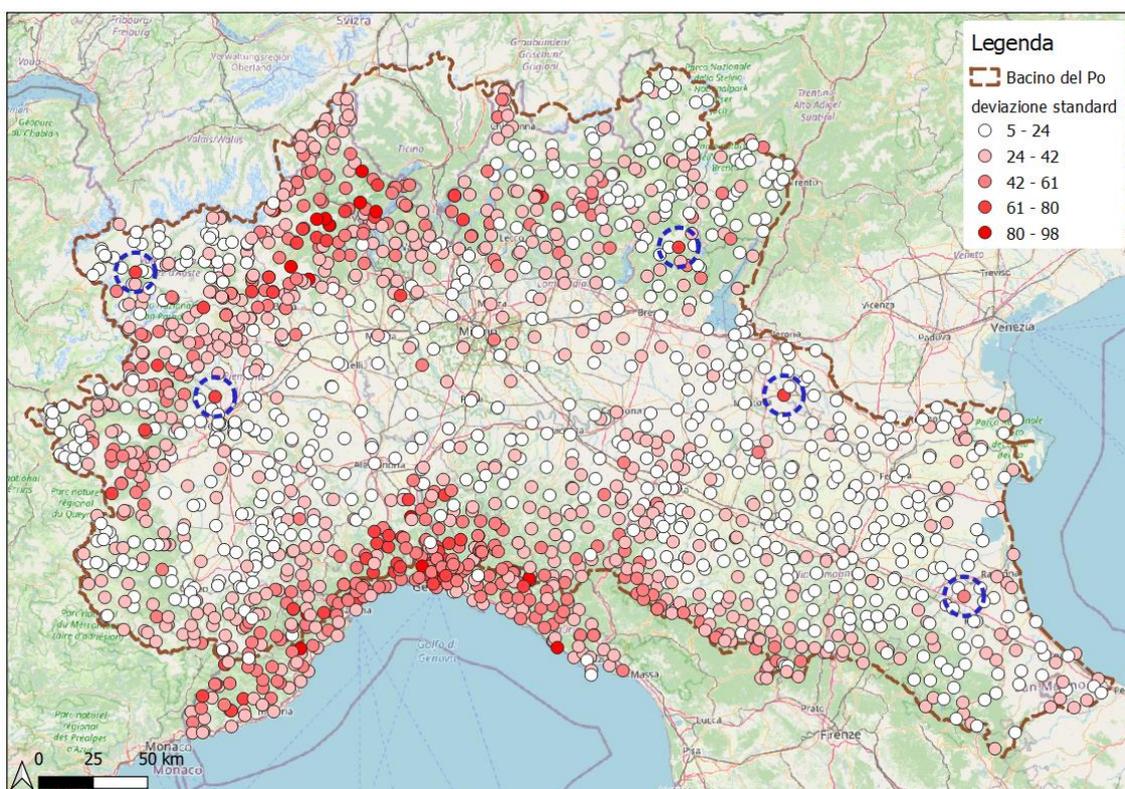


Figura 7.5 - Distribuzione spaziale della deviazione standard del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione

Per questi 5 valori anomali si sono analizzate le misurazioni delle precipitazioni acquisite dalle stazioni stesse, per verificare se fossero errori attribuibili a separatori decimali fuori posto nei dati originali (inconveniente frequente su studi simili), ma non riscontrando

alcuna irregolarità, si sono visionati i relativi grafici delle serie storiche, rilevando dei giorni isolati con valore di precipitazione giornaliera molto più alta rispetto al contesto; si è cercato nelle cronache, su internet, notizie, non ottenendo risultati. Si eseguono ulteriori operazioni di ricerca: si consulta il database I²-RED riscontrando o meno la presenza delle stazioni attenzionate nel periodo di riferimento; in caso di assenza della stazione o del giorno, si identifica la stazione più vicina di I²-RED attiva nello stesso periodo; si confronta per lo stesso giorno il valore massimo a 12 o 24 h riportato in I²-RED con il valore massimo giornaliero del nuovo database per ottenere la veridicità o meno del valore anomalo.

Al termine della fase di verifica, i valori non confermabili si modificano nel dataset, sostituendoli manualmente con un 'NaN'.

Nella Figura 7.6 si riporta schematicamente la specificità dei controlli effettuati:

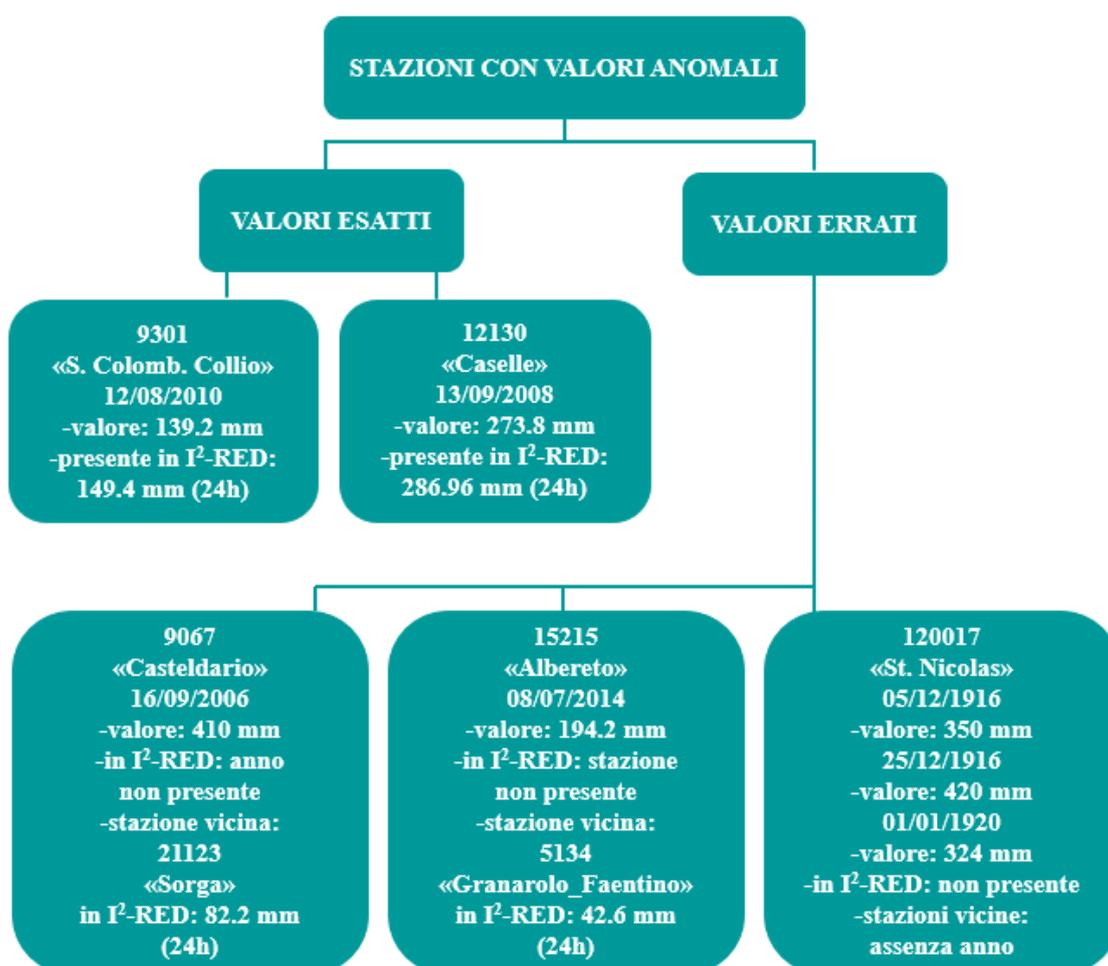


Figura 7.6 - Schema dei dati analizzati delle stazioni con valori anomali

A titolo d'esempio si riportano 2 dei 5 casi:

1) caso di accertamento positivo: stazione 9301 "S. Colomb. Collio".

Dal grafico della serie storica (Figura 7.7) si evince il picco di precipitazione nel giorno 12/08/2010; dopo la verifica su I²-RED (Figura 7.8), essendo i valori di poco discostanti, si conferma il dato presente nel nuovo database.

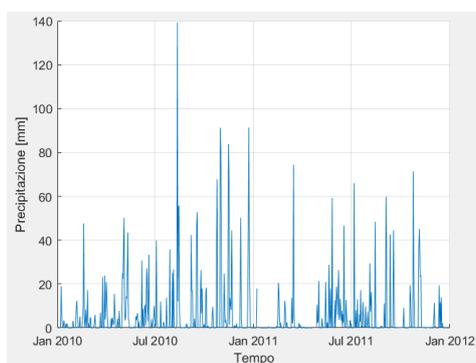


Figura 7.7 - Grafico della serie storica della stazione 9301

122217x7 double

	1	2	3	4	5	6	7
50879	9301	2009	30.6000	34.4000	58	103	175.4000
50880	9301	2010	66.2000	97.2000	99.2000	102.6000	149.4000
50881	9301	2011	40.6000	44.8000	48	58.4000	74.6000

Figura 7.8 – Valore massimo a 24 h della stazione 9301 in I²-RED

2) caso di accertamento negativo: stazione 9067 "Casteldario".

Dal grafico della serie storica (Figura 7.9) si evince il picco di precipitazione nel giorno 16/09/2006; dopo la verifica su I²-RED della stazione vicina (Figura 7.10), essendo la differenza tra i valori molto alta, non si ritiene opportuno confermare il dato presente nel nuovo database; pertanto, si procede alla sostituzione del valore inesatto con 'NaN' (Figura 7.11).

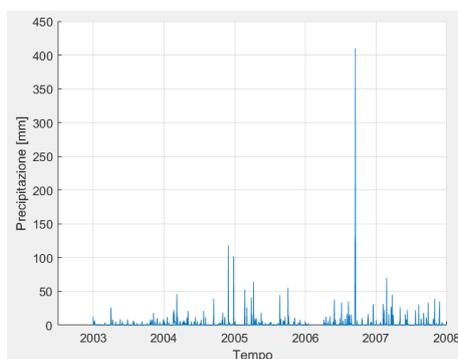


Figura 7.9 - Grafico della serie storica della stazione 9067

122217x7 double							
	1	2	3	4	5	6	7
116586	21123	2005	28	52.2000	70.6000	72.4000	78.2000
116587	21123	2006	40.6000	44	51	69	82.8000
116588	21123	2007	27.8000	30.6000	30.6000	31	39.8000

Figura 7.10 - Valore massimo a 24 h della stazione 21123 in P²-RED

25741574x5 double					
	1	2	3	4	5
8807418	9067	2006	9	15	102
8807419	9067	2006	9	16	NaN
8807420	9067	2006	9	17	19.2000

Figura 7.11 - Sostituzione manuale con 'NaN' per il valore errato

Modificati i dati, eseguite nuovamente le varie operazioni su Matlab e QGIS, si riporta la nuova distribuzione spaziale della deviazione standard ottenuta con il set di dati corretti (Figura 7.12).

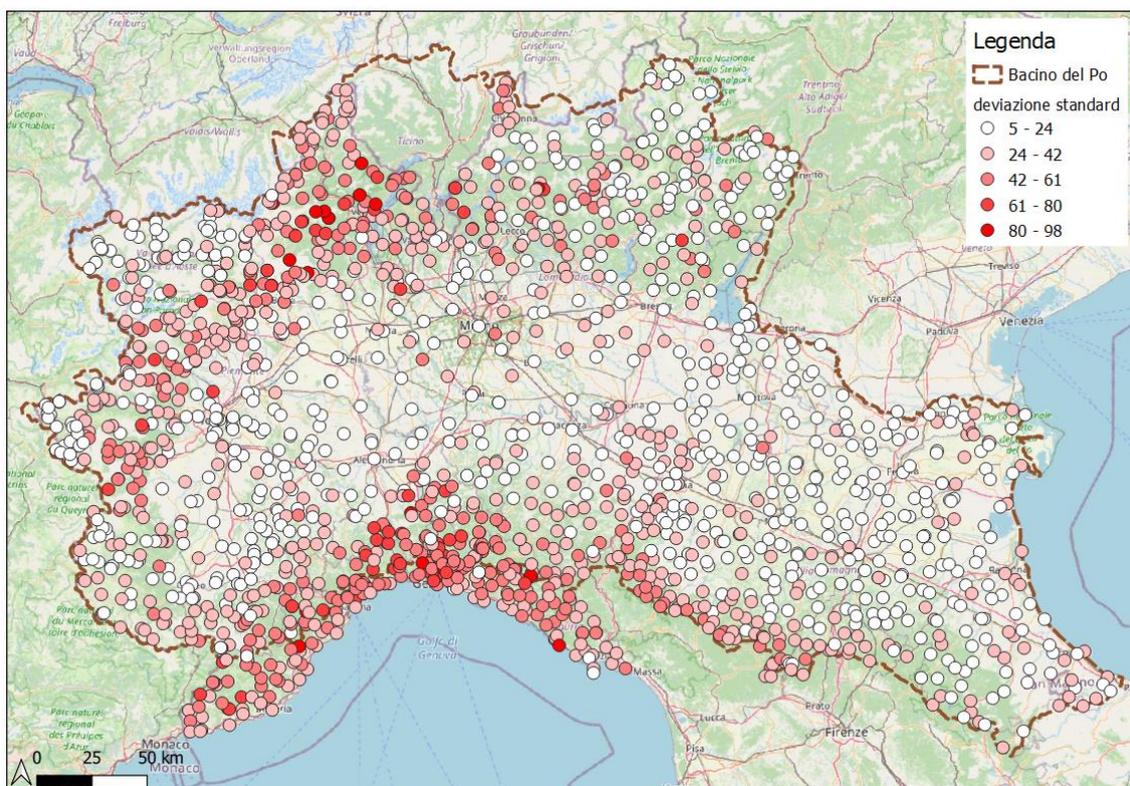


Figura 7.12 - Distribuzione spaziale della deviazione standard del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche

Si riportano di seguito le distribuzioni spaziali di tutte le altre statistiche, prima e dopo le modifiche.

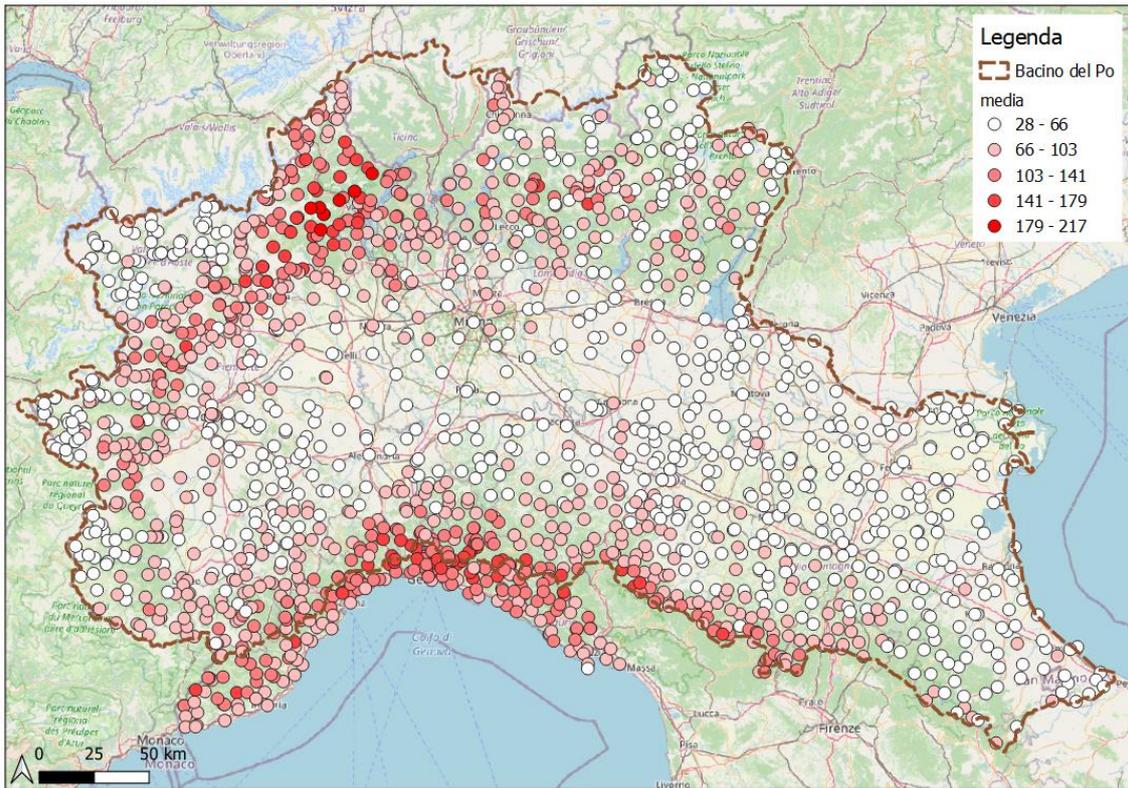


Figura 7.13 - Distribuzione spaziale della media del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione prima delle modifiche

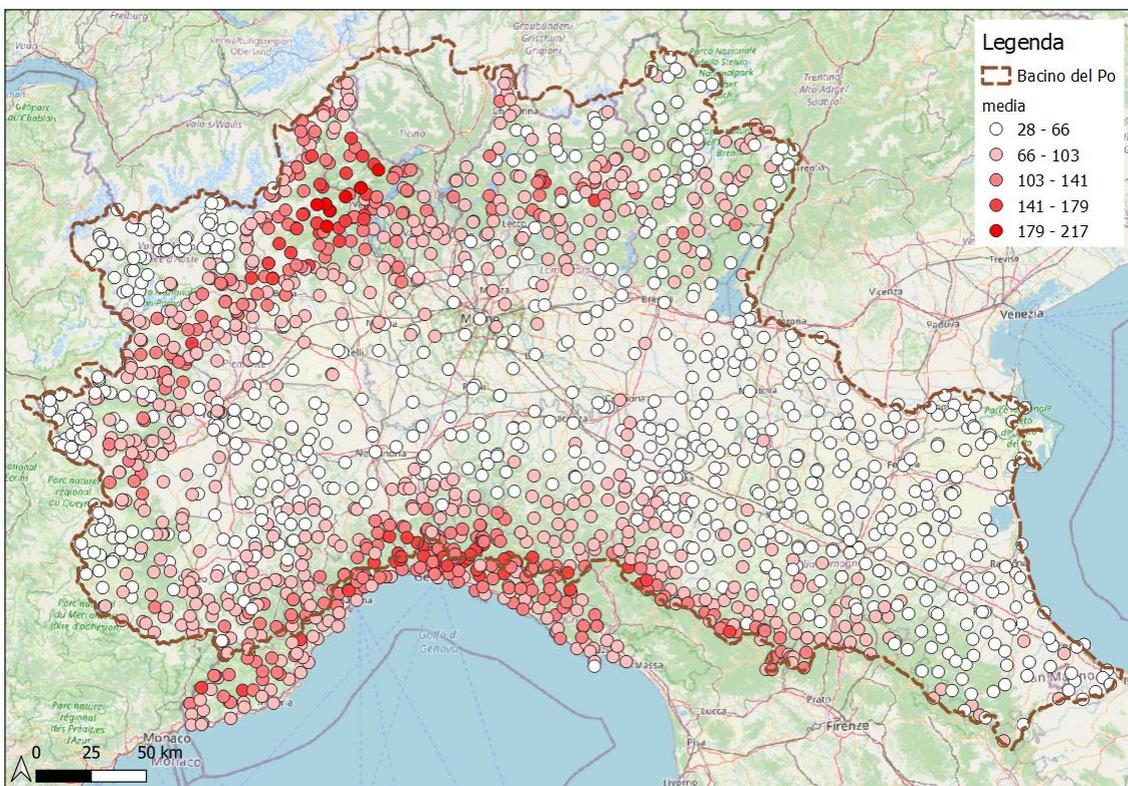


Figura 7.14 - Distribuzione spaziale della media del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche

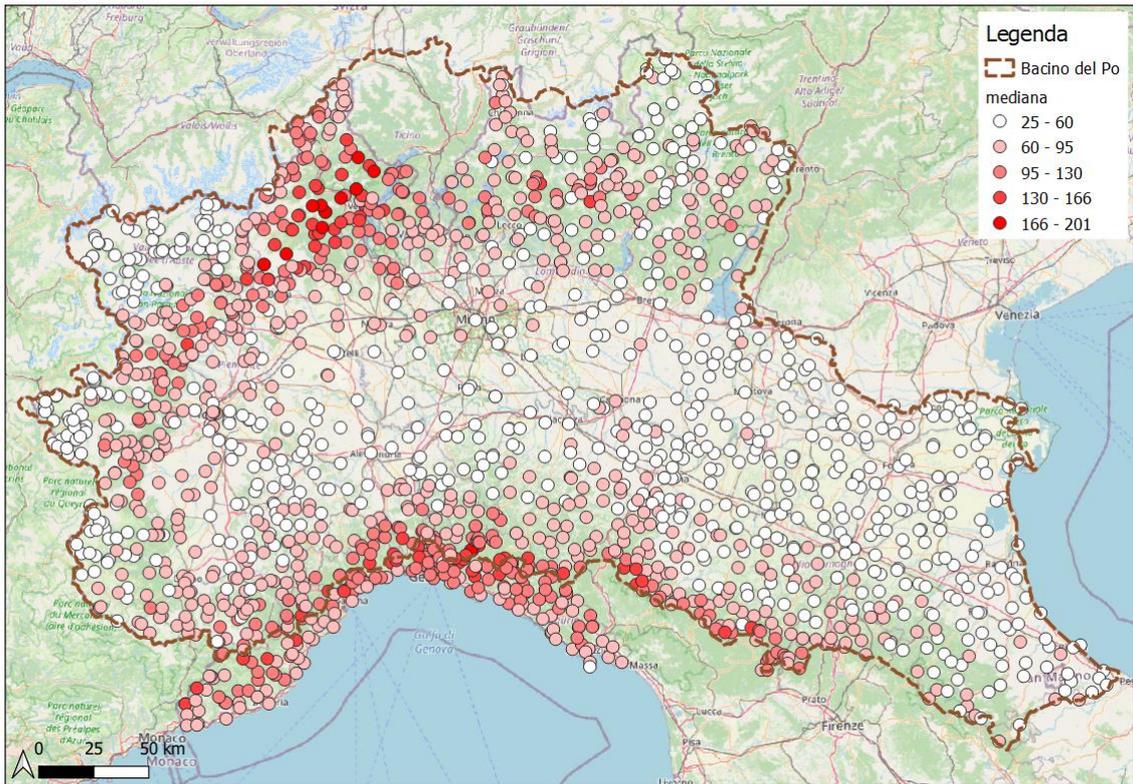


Figura 7.15 - Distribuzione spaziale della mediana del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione prima delle modifiche

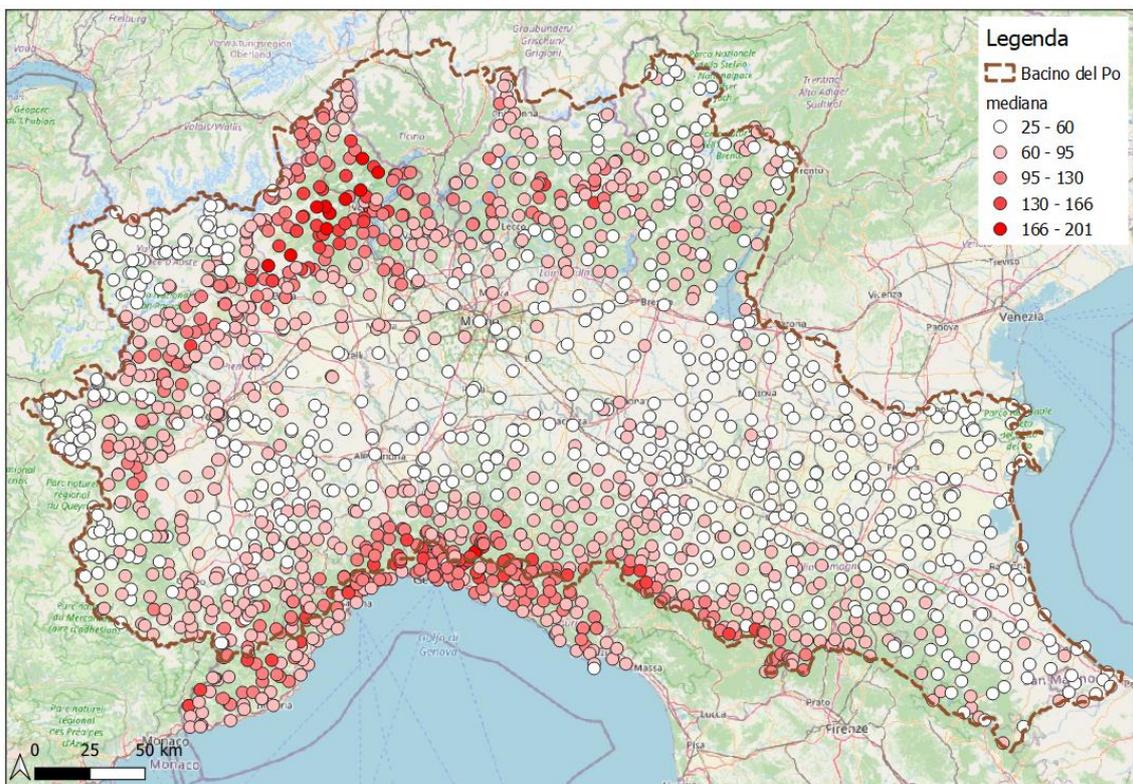


Figura 7.16 - Distribuzione spaziale della mediana del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche

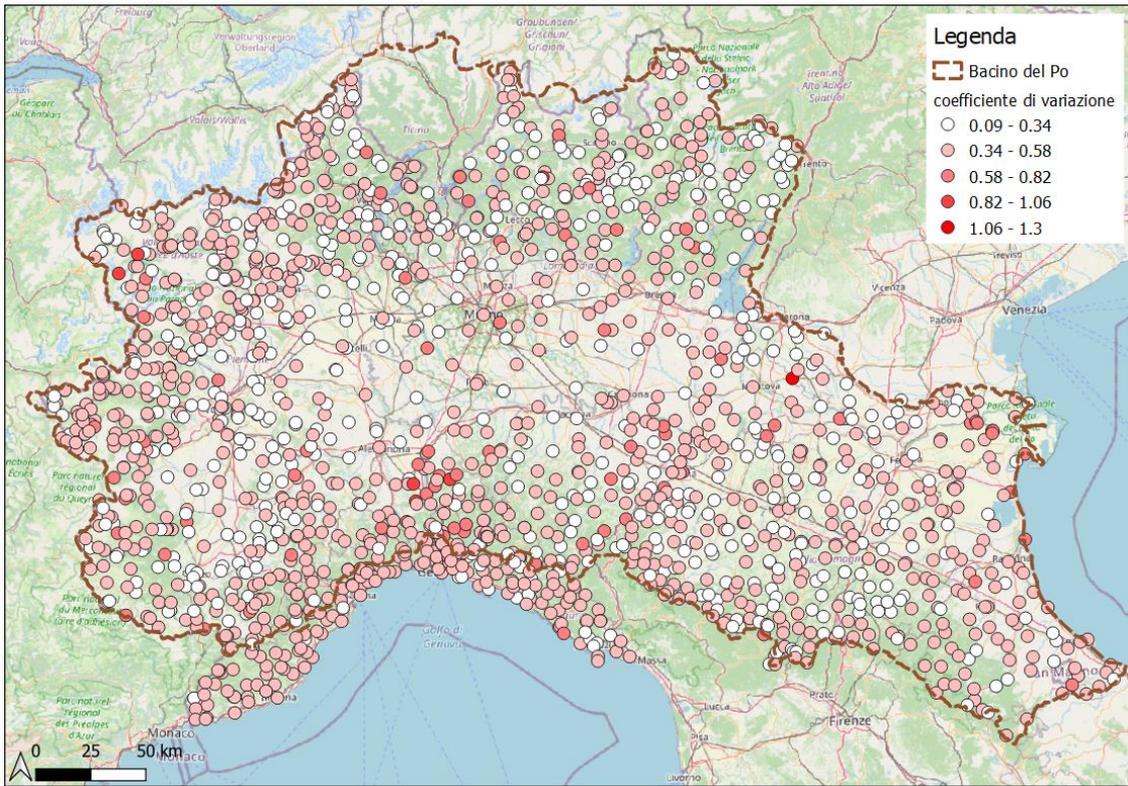


Figura 7.17 - Distribuzione spaziale del coefficiente di variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione prima delle modifiche

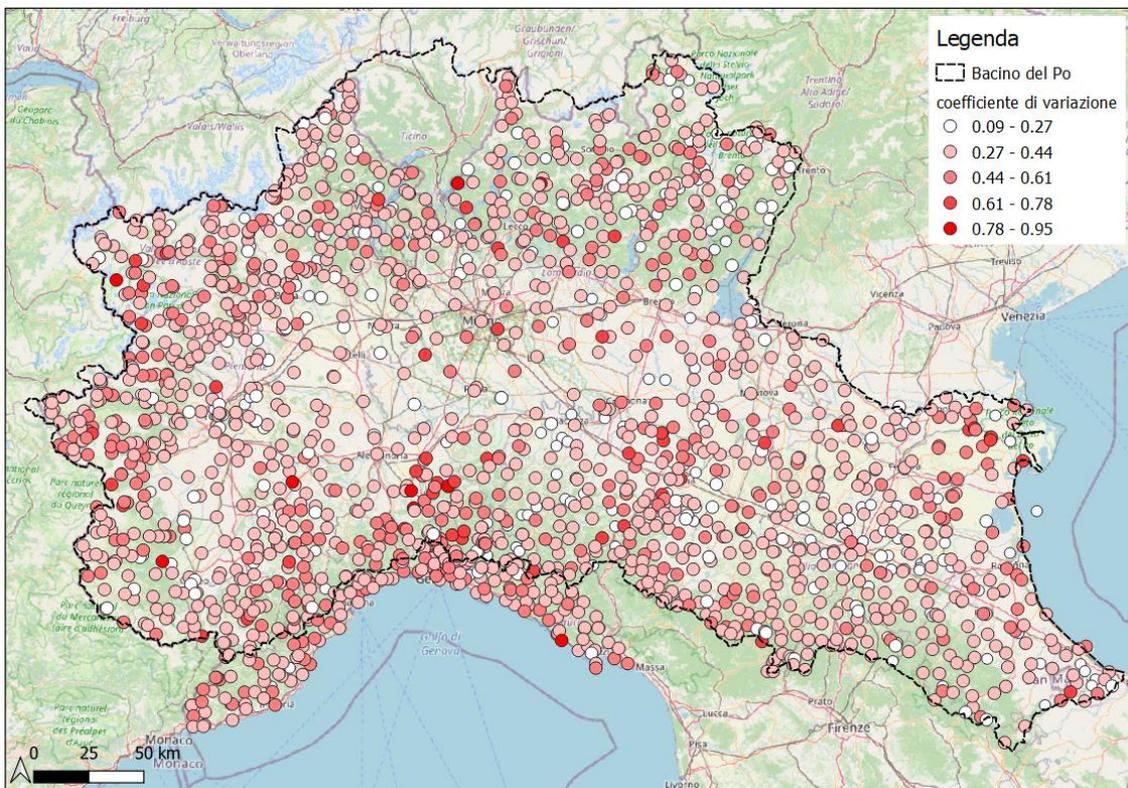


Figura 7.18 - Distribuzione spaziale del coefficiente di variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche

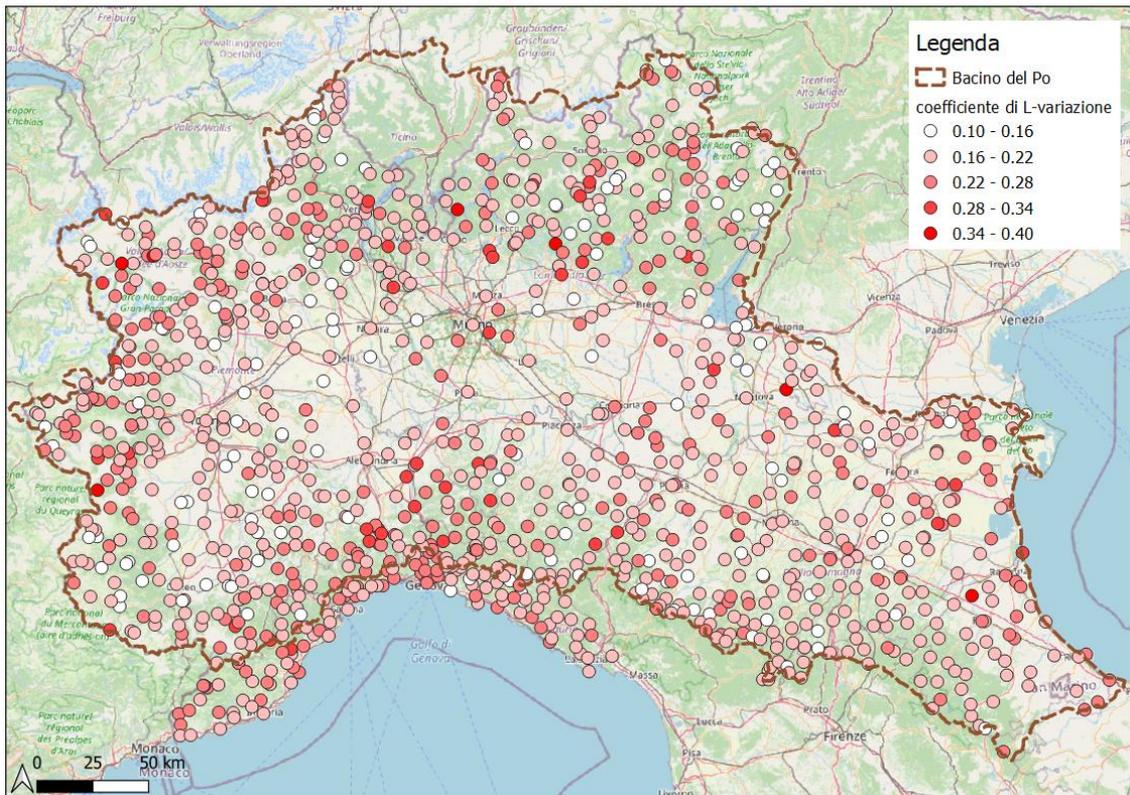


Figura 7.19 - Distribuzione spaziale del coefficiente di L-variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione prima le modifiche

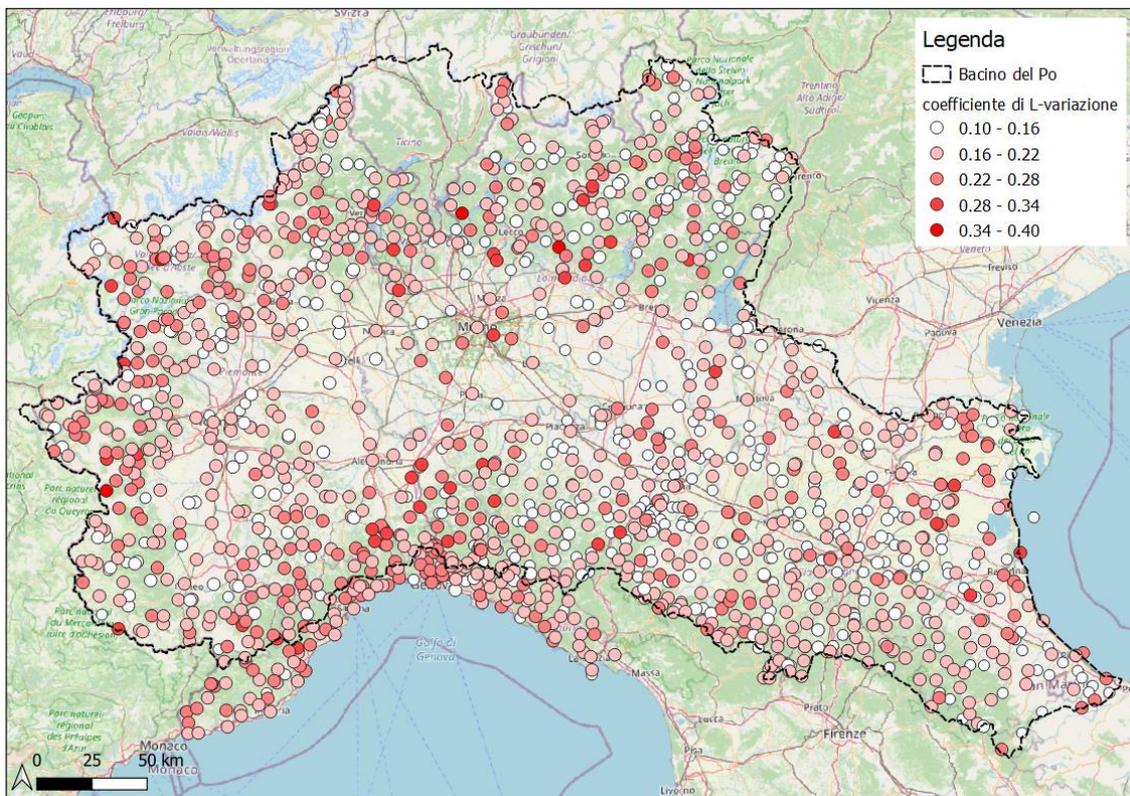


Figura 7.20 - Distribuzione spaziale del coefficiente di L-variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche

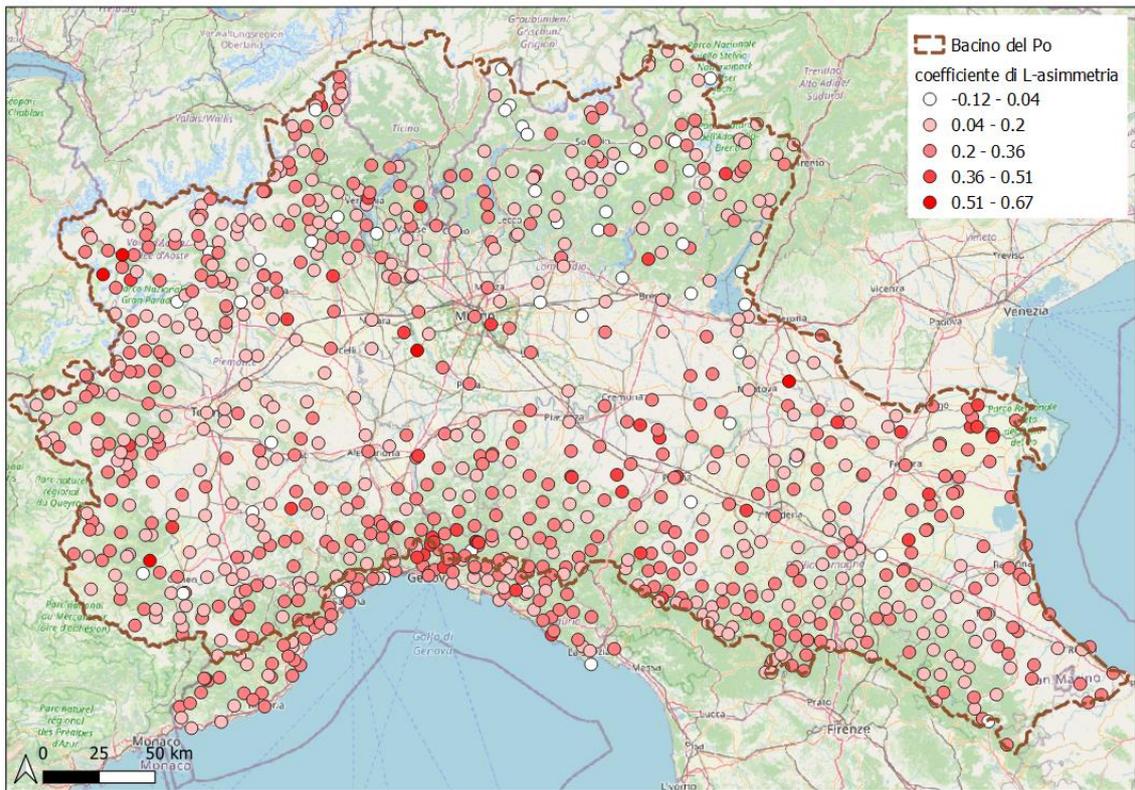


Figura 7.21 - Distribuzione spaziale del coefficiente di L-asimmetria del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione prima delle modifiche

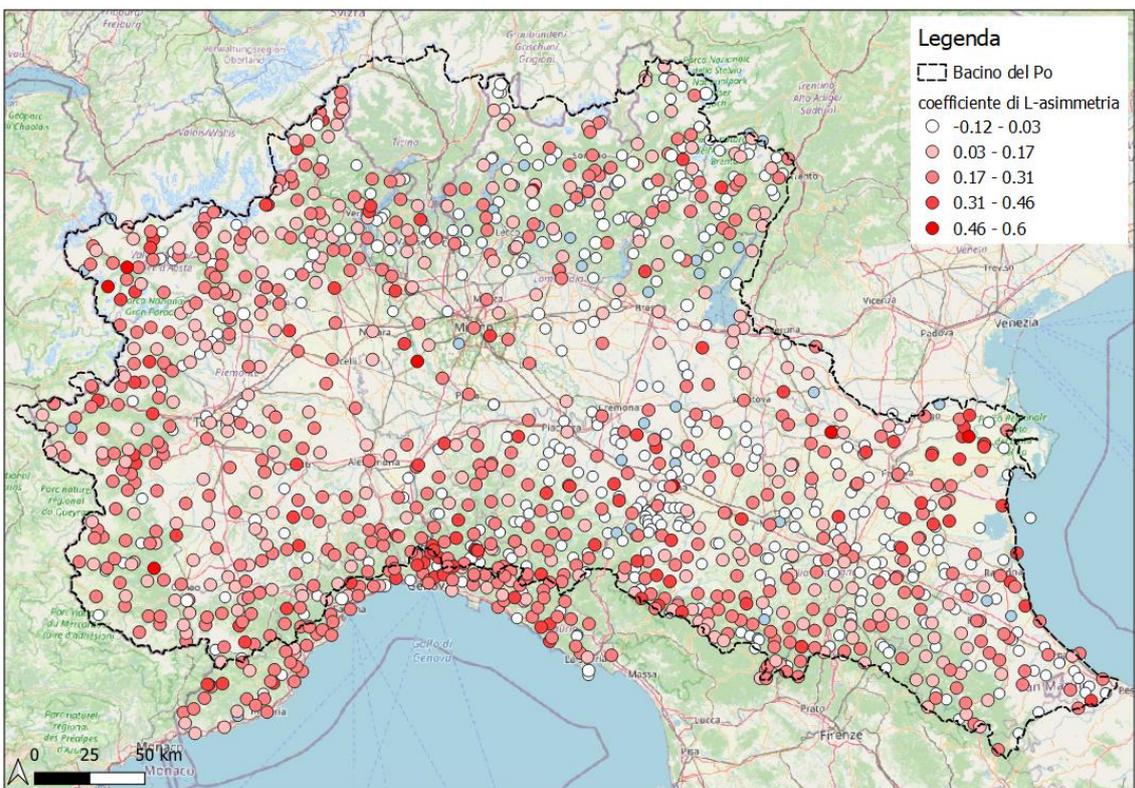


Figura 7.22 - Distribuzione spaziale del coefficiente di L-asimmetria del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione dopo le modifiche

7.4 INTERPOLAZIONE SPAZIALE DELLE STATISTICHE DESCRITTIVE

Stante la complessa comprensione delle rappresentazioni puntuali delle statistiche descrittive delle precipitazioni, si è proceduto all'interpolazione spaziale delle stesse. Si sono ricavate le mappe attraverso l'utilizzo di una procedura automatica basata sulla funzione *autoKrige* del pacchetto *automap* di R. Per l'elaborazione si specifica il tipo di Kriging, la griglia di interpolazione ed è richiesto il dato di input:

- ID delle stazioni;
- coordinate geografiche;
- valori delle statistiche descrittive.

Le mappe sono state derivate con una risoluzione di 250 metri utilizzando un Kriging Ordinario con variogrammi generati automaticamente utilizzando *autofitVariogram*. La funzione *autoKrige* restituisce la mappa delle statistiche sulle precipitazioni con i risultati della procedura di interpolazione.

Una particolare considerazione è rivolta all'area della Svizzera con assenza di dati che ricade all'interno del bacino del Po: il Kriging restituisce comunque un'interpolazione dei dati, pari alla media delle stazioni nelle vicinanze, che però risulta non attendibile.

Vengono di seguito riportate le mappe ottenute della media (Figura 7.23), della deviazione standard (Figura 7.24), della mediana (Figura 7.25), del coefficiente di variazione (Figura 7.26), del coefficiente di L-variazione (Figura 7.27) e del coefficiente di L-asimmetria (Figura 7.28) del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione.

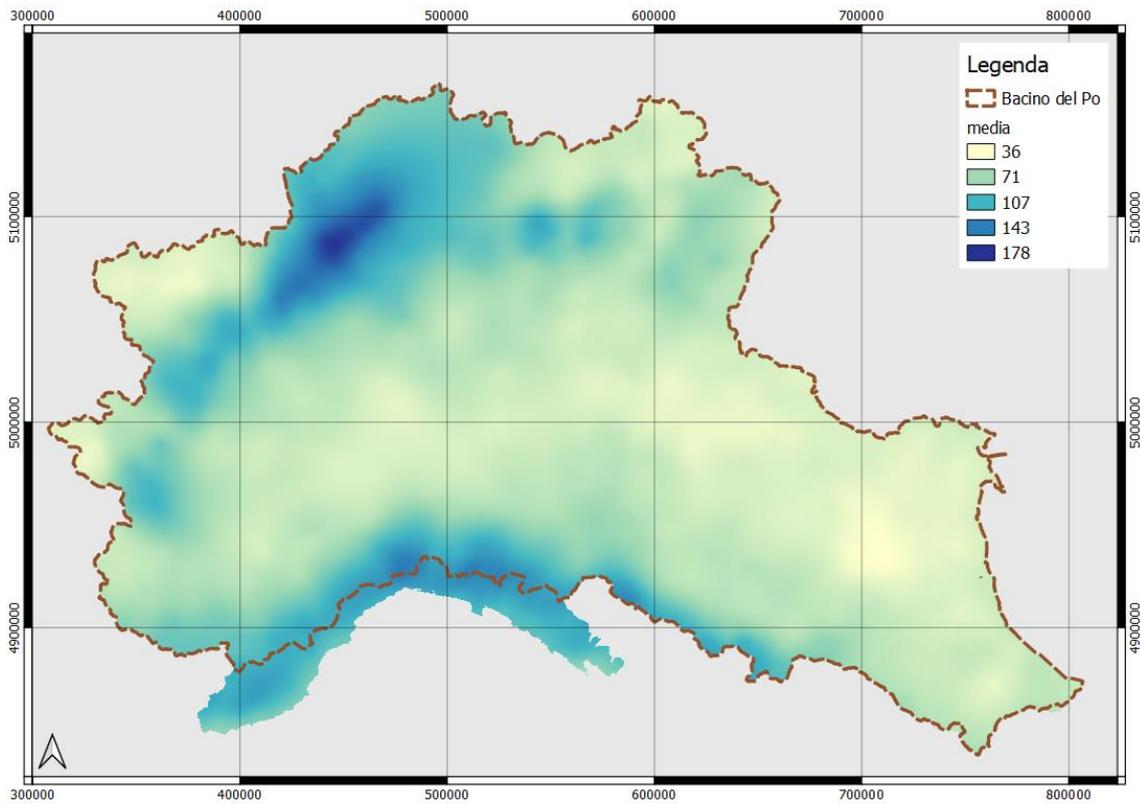


Figura 7.23 - Interpolazione spaziale della media del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione

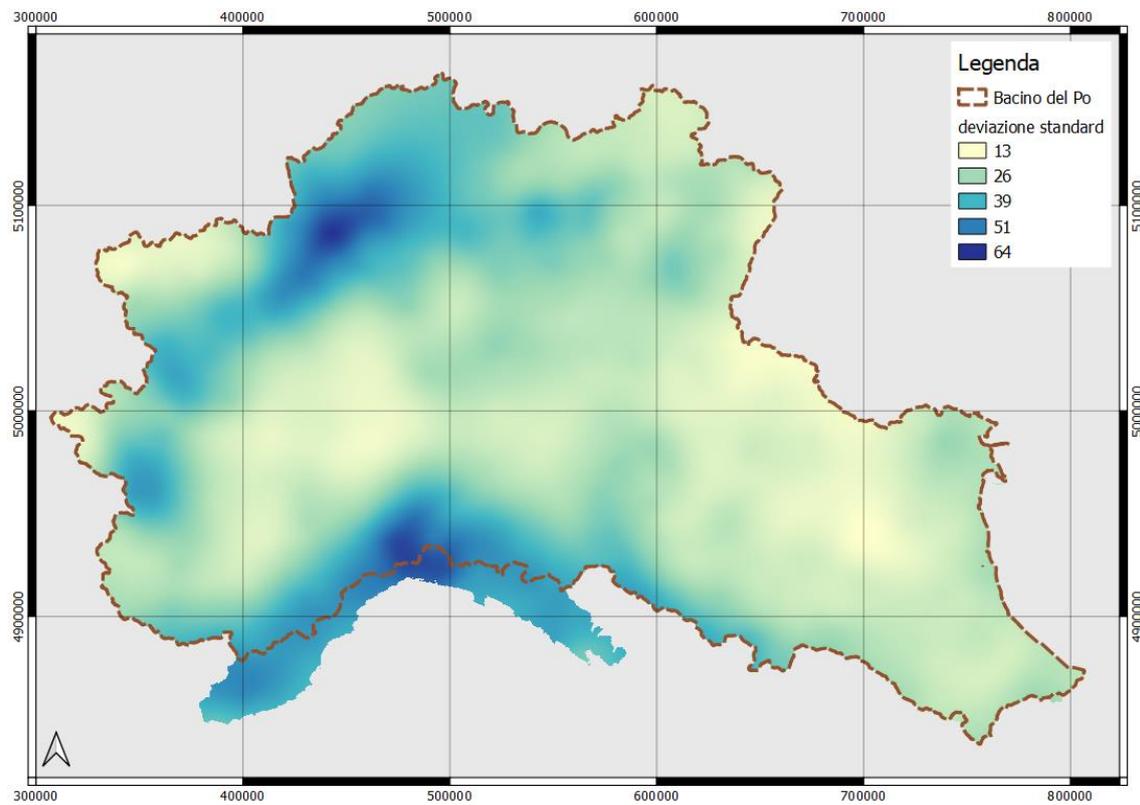


Figura 7.24 - Interpolazione spaziale della deviazione standard del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione

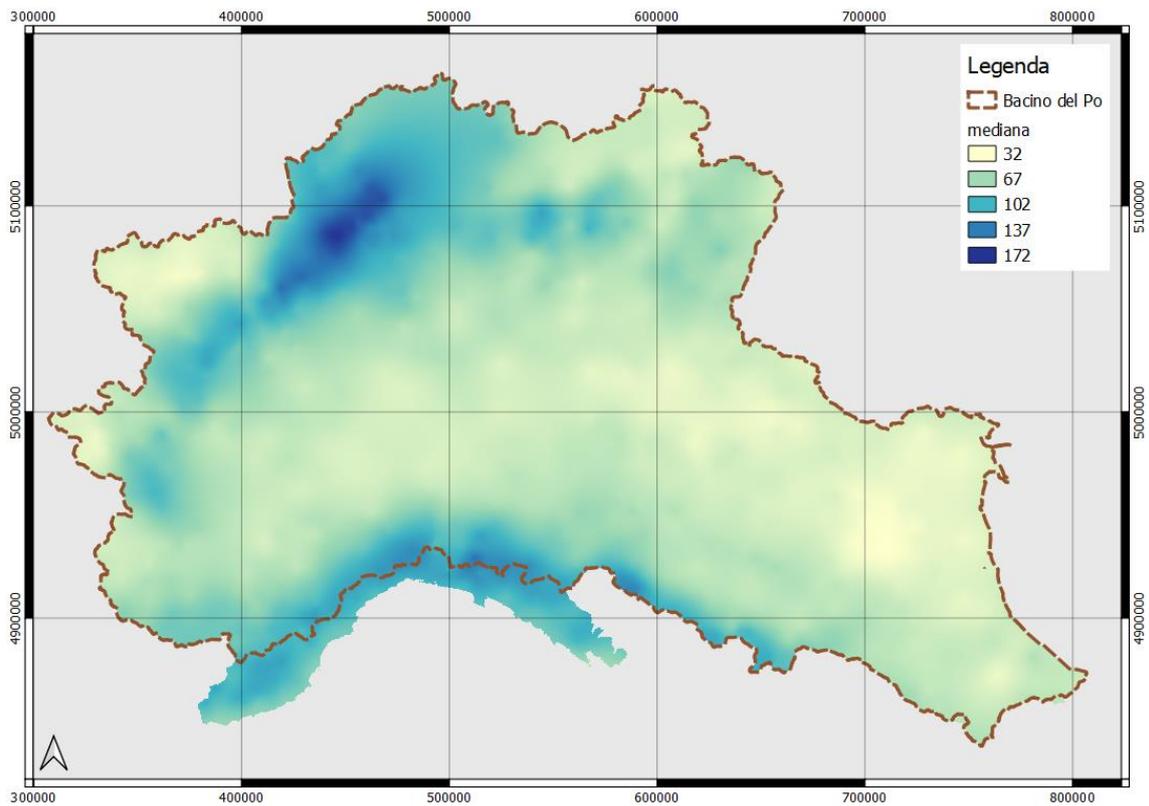


Figura 7.25 - Interpolazione spaziale della mediana del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione

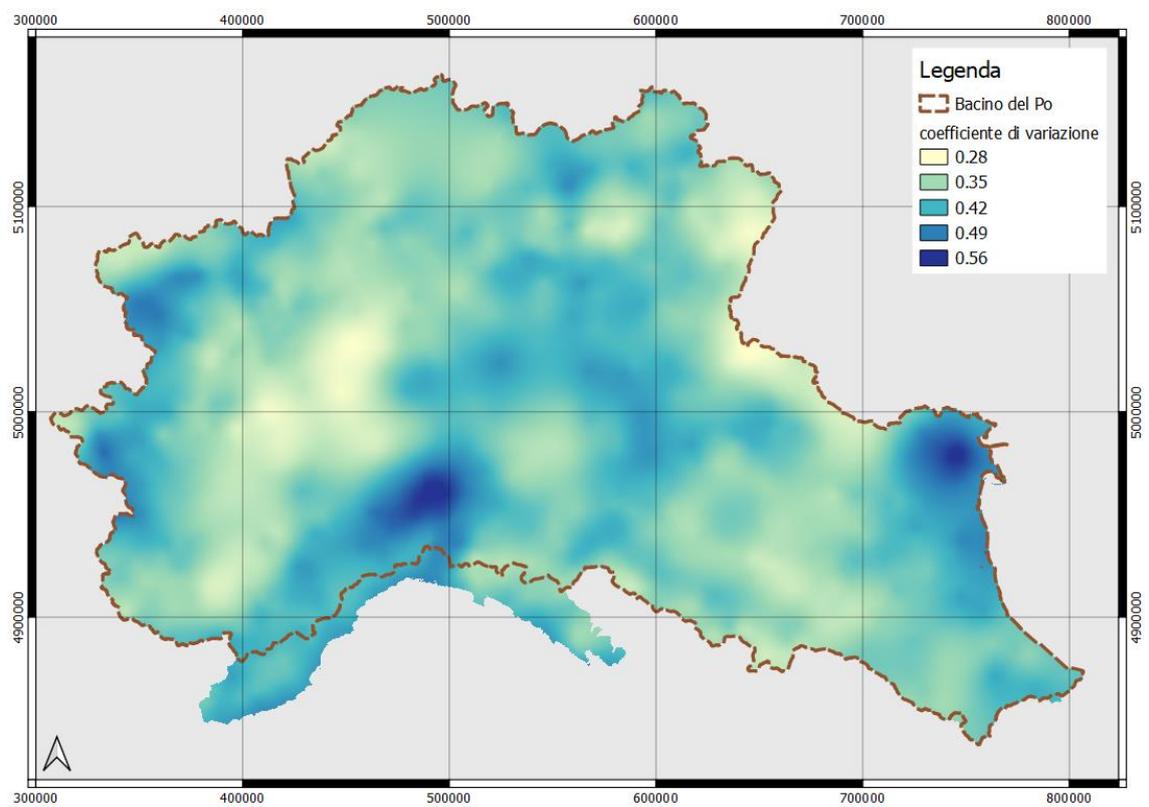


Figura 7.26 - Interpolazione spaziale del coefficiente di variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione

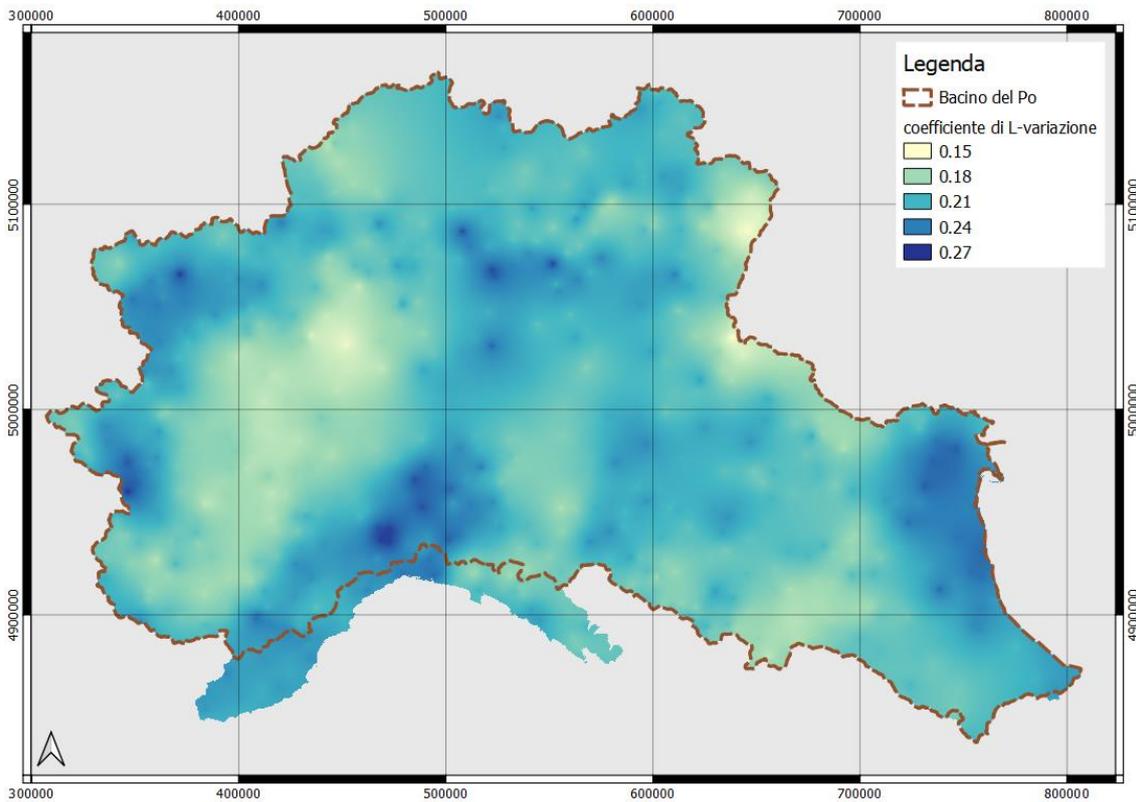


Figura 7.27 - Interpolazione spaziale del coefficiente di L-variazione del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione

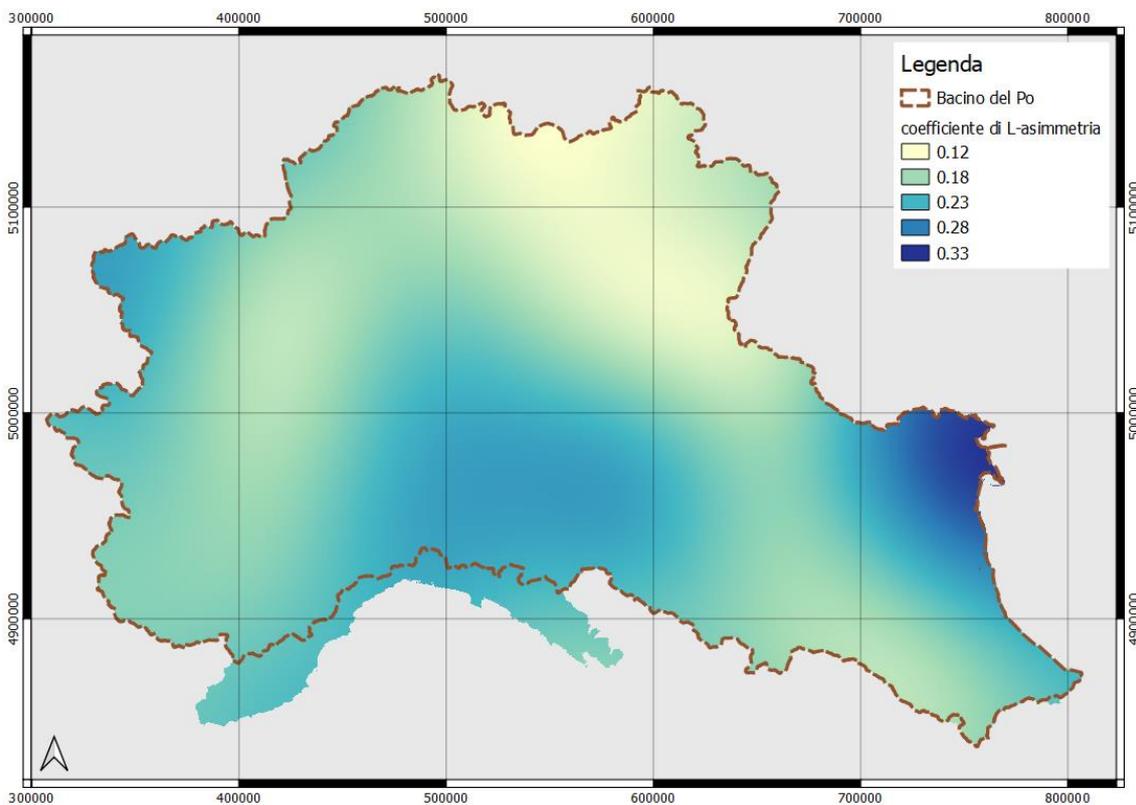


Figura 7.28 - Interpolazione spaziale del coefficiente di L-asimmetria del massimo annuo di altezza giornaliera di precipitazione

8. RELAZIONE DI HERSHFIELD TRA MASSIMI A DIVERSO INTERVALLO DI MISURA

8.1 ANALISI DELLA LETTERATURA

In letteratura sono diversi gli autori che si sono interessati alla tematica riguardante la relazione tra valori massimi giornalieri e quelli di 24 ore.

Il fattore di Hershfield (H) è un moltiplicatore che mira a correggere l'errore tra i massimi dell'intervallo di tempo fisso (F-maxima) e i massimi scorrevoli (S-maxima) come conseguenza diretta della discretizzazione temporale delle serie temporali idrometeorologiche. Le serie fisse non sono appropriate per la stima dei massimi delle precipitazioni (Hershfield, 1961) poiché spesso sono sottostimate (Van Montfort, 1990). Per tenere conto del bias intrinseco dovuto alla discretizzazione fissa delle precipitazioni, si può considerare il fattore di Hershfield (H), un moltiplicatore di 1,13 in media, dei massimi delle precipitazioni (*Papalexiou et al., 2016*). Nel 1997 Van Montfort dimostrò che $1 \leq H \leq 2$. Questo valore di H è stato stimato per la scala temporale di 1440 min (ovvero, finestra scorrevole di 1440 min vs. osservazioni giornaliere fisse), ma lo stesso valore è stato stimato anche per la scala temporale di 60 min (ovvero, finestra scorrevole di 60 min vs. osservazioni orarie fisse), ed è stato caratterizzato come casuale.

Inoltre, studi confermano che il fattore H è influenzato dal rapporto delle scale temporali ed è associato alle caratteristiche delle precipitazioni. Per ciascuna scala temporale (2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 24, 30, 36, 42 e 48 ore) sono state stimate le statistiche quali: mediana, media, deviazione standard, coefficiente di variazione e tre misure di forma basate sugli L-momenti (Hosking, 1992). I risultati di mediana, valor medio e deviazione standard di F- e S-maxima mostrano che i valori delle statistiche S-maxima sono superiori a quelli di F-maxima ed hanno una dispersione maggiore; la differenza tra le statistiche F- e S-massimi aumenta con l'aumentare della scala temporale e sembra diventare costante per scale temporali maggiori di 36 ore. Oltre al comune fattore H che corregge l'errore del valore medio (H_μ), può essere definito un altro tipo di fattore H, ovvero quello che

corregge l'errore di deviazione standard (H_σ). Nello stesso studio si introduce il fattore H che corregge l'errore di deviazione standard, quello che corregge sia l'errore medio che quello di deviazione standard, basandosi su una doppia trasformazione lineare, e quello basato su una correzione media ma non esatta sia della media che degli errori di deviazione standard. La distribuzione empirica del fattore H risulta di tipo misto, a forma di J e fortemente asimmetrica.

Una formulazione regionale delle curve Intensità-Durata-Frequenza dei massimi punti-piuvosità viene proposta in un quadro del valore estremo generalizzato (GEV) invariante su scala (*Blanchet et al., 2016*). Le proprietà statistiche delle precipitazioni estreme su scale temporali diverse sono correlate tra loro da un operatore che coinvolge solo il rapporto di scala e l'esponente di scala; è quindi possibile inferire le proprietà statistiche del processo a risoluzioni più fini, ed in particolare stimare curve IDF a durate per le quali non sono disponibili dati. Partendo da dati giornalieri e orari di circa 300 stazioni di raccolta giornaliera che coprono gli ultimi 50 anni e accumulate per coprire l'intervallo 1 giorno – 1 settimana della regione mediterranea delle Cévennes-Vivarais in Francia, sono stati creati due nuovi database aggregando piogge giornaliere a 48, 72, 96, 120, 144 e 168 h e piogge orarie a 2, 3, 4, 8, 12, 24, 48, 72, 96, 120, 144 e 168 ore. La letteratura fornisce due modi principali per correggere la frequenza di misurazione: il primo si basa sul fattore di Hershfield, presupponendo che le intensità massime con frequenza di misurazione di 1/24 h e 1/h alla durata D sono collegate; il secondo si basa sulla teoria del valore estremo (EVT) e garantisce che le funzioni di distribuzione di $I_D^{(24)}$ e $I_D^{(1)}$ siano approssimativamente collegate tra loro. Il modello proposto si rivela molto soddisfacente in tutta la regione per durate fino a 8 ore, ma mostra limitazioni per durate più brevi anche dopo la correzione della frequenza di misurazione.

Nello studio applicato ai dati di Marsiglia (*Muller et al., 2007*), vengono presentati due modelli: un modello classico empirico basato sulla distribuzione dei valori estremi generalizzata per le precipitazioni massime orarie, e un modello empirico migliorato dall'inclusione delle precipitazioni massime giornaliere, attraverso gli indici estremi dei dati delle precipitazioni orarie e giornaliere, che descrivono gli estremi dello stesso processo, ma con frequenza di campionamento diversa: massima piovosità annua, aggregata su un periodo di 24 h, a partire da qualsiasi ora di calendario, e massima piovosità giornaliera annua. Quando sono disponibili dati giornalieri, le loro serie sono spesso più lunghe, più affidabili e la rete di pluviometri giornalieri è geograficamente più

densa. Si può usare una relazione empirica (Weiss 1964, equazione 8.1) considerando una stima del fattore di Hershfield di 1.14 (Hershfield 1961).

$$H_{24} = 1.14 H_D \quad (8.1)$$

Poiché le precipitazioni cumulative estreme di breve e lunga durata derivano da diversi processi meteorologici, generalmente le brevi da piogge convettive/temporali e le lunghe da piogge frontali (Llasat (2001); Garcia-Bartual e Schneider (2001)), sono stati presi in considerazione due intervalli di durata: per le precipitazioni di breve durata (meno di 7 ore) è stato scelto un modello classico empirico e per le precipitazioni di lunga durata (oltre le 7 ore), che contengono le precipitazioni giornaliere, il modello dell'indice estremo. Vengono proposte tre formulazioni di verosimiglianza per modellare e confrontare le ipotesi di indipendenza o dipendenza tra le diverse durate: la prima afferma l'indipendenza tra sette durate (1, 6, 12, 24, 48, 72 ore e le giornaliere); la seconda afferma l'indipendenza tra quattro durate (si presume che i massimi di 1 e 72 ore abbiano origine da processi diversi); la terza considera le quattro durate con dipendenza di due e afferma la dipendenza tra 24 e 72 ore di pioggia massima attraverso una distribuzione estrema bivariata. I risultati sono calcolati in un framework bayesiano con un algoritmo Markov Chain Monte Carlo (Renard et al. (2006)). L'applicazione alla serie di dati di Marsiglia (67 anni di dati orari (1918-2002) e 122 anni di dati giornalieri (1882-2003), con meno del 10% di valori mancanti per anno) mostra un miglioramento delle stime orarie grazie alla combinazione tra dati orari e giornalieri, e confermato dal confronto tra i valori estremi giornalieri e orari dove emerge la difficoltà di registrare eventi di pioggia estremi dal pluviometro a registrazione oraria; il periodo scelto come rappresentativo degli eventi estremi è stato settembre-gennaio per le forti piogge orarie e giornaliere. I risultati sono significativamente differenti con o senza ipotesi di dipendenza: le intensità di pioggia sulle durate 12-72 ore risultano collegate tra loro e con le precipitazioni giornaliere.

Partendo dal lavoro svolto da Hershfield nel 1990, il quale ipotizzava lo stesso tipo di distribuzione per i massimi F e A senza alcuna relazione tra i parametri F e A, si è giunti a delineare restrizioni su tali parametri e a presentare la procedura di stima per il fattore di Hershfield sui soli dati F (*van Montfort, 1997*). Si sono analizzati i massimi mensili delle quantità giornaliere di precipitazioni di un set di dati con 130 stazioni in 30 anni, nel periodo 1953-1982, con quantità di precipitazioni in 1, 2, 3, 4, 7 e 10 giorni, nella metà orientale della Cina, coprendo un'area di circa 7 milioni di km². Si sono scelti due tipi di variabili: variabili non legate al processo di pioggia, longitudine-latitudine-quota,

e variabili legate al processo di pioggia, autocorrelazione nelle serie temporali giornaliere e frazione di giorni piovosi, misurata su base mensile. Dai risultati emergono: valori di H relativamente bassi (1.04) nei mesi di marzo e aprile; valori di H alti (1.17) nei mesi di gennaio, febbraio e da giugno a ottobre; valori di H associati positivamente all'autocorrelazione e alla frazione di giorni piovosi; valori di H variabili su area vasta.

Si rende necessario affrontare il problema della disomogeneità del tempo di aggregazione delle serie storiche dei dati pluviometrici, dovuto principalmente alla tipologia di pluviometro e al sistema di registrazione, che porta ad avere lunghe serie di valori di precipitazioni con un numero rilevante di possibili valori sottostimati (*Morbidelli et al., 2021*). L'obiettivo è quello di migliorare l'uso delle serie storiche di precipitazioni estreme attraverso la loro omogeneizzazione rispetto al tempo di aggregazione. Poiché per durate vicine al tempo di aggregazione l'effettiva altezza massima delle precipitazioni può essere sottostimata, è possibile rappresentare l'errore medio per una serie temporale con un numero elevato di elementi, considerandolo una variabile casuale che segue una distribuzione di probabilità esponenziale con entità inversamente correlata all'altezza di precipitazione; questo errore medio dipende sia dal tempo di aggregazione sia dalla forma degli ietogrammi delle precipitazioni. Poiché l'uso di serie di valori di altezze di precipitazione "non corretti" può portare a sottostime di circa il 10% nel determinare le curve di intensità-durata-frequenza, correggendo ogni valore di altezza di precipitazione con relazioni algebriche tra l'errore medio di sottostima e il rapporto tra tempo di aggregazione e durata, si possono ottenere serie omogenee utilizzabili per ogni tipo di analisi.

Tra i vari metodi disponibili, il metodo di Hershfield è considerato un metodo statistico conveniente ed efficace per la stima della PMP (Probabile Massima Precipitazione), a condizione che siano disponibili registrazioni delle precipitazioni sufficientemente lunghe (*Sarkar et al., 2020*). Il passo cruciale nel metodo di Hershfield è la stima precisa del fattore di frequenza (K) e la sua tecnica di involuppo. Le stime della PMP con il metodo di Hershfield sono risultate essere strettamente paragonabili a quelle di altri approcci fisici in diverse parti del mondo, ad esempio per Canada, Stati Uniti, Islanda e Australia; l'articolo si occupa di precipitazioni giornaliere uniformemente distribuite in tutta l'India dal 1901 al 2010. Hershfield ha proposto la formulazione:

$$X_{PMP} = \bar{X}_N + K * S_N \quad (8.2)$$

dove X_{PMP} è la stima della PMP per una particolare località, \bar{X}_N è la media della serie AMDP (Annual Maximum Daily Precipitation) per N anni in quella località, S_N è la deviazione standard della serie AMDP in quella località, K è il fattore di frequenza per la stima PMP in quella posizione, che può essere determinato dalla seguente equazione:

$$K = \frac{X_m - \bar{X}_{N-1}}{S_{N-1}} \quad (8.3)$$

dove X_m è il valore massimo nella serie AMDP, \bar{X}_{N-1} è la media e S_{N-1} è la deviazione standard della serie AMDP, per (N-1) anni dopo aver rimosso l'anno con il massimo valore. Hershfield ha inizialmente condotto un'indagine su 2700 stazioni (quasi il 90% di stazioni statunitensi e il restante 10% di diverse altre parti del mondo) per determinare il fattore di frequenza K e ha riscontrato che K varia in un intervallo da poco meno di 3 a un valore più alto di 14,5, scoprendo che K non è indipendente dalla magnitudo delle precipitazioni e quindi non può avere un valore universale, anche considerando che un unico valore universale di 15 può essere troppo alto come K per le aree con precipitazioni abbondanti e troppo basso per le aree aride.

Un approfondimento (*Penta, 1974*) considera la variabile causale h_g , massimo annuale dell'altezza di pioggia giornaliera caduta in un punto, distribuita secondo la prima legge asintotica del massimo valore o di Gumbel ed $h_{g,T}$, massimo valore che h_g può raggiungere, di norma, una volta ogni T anni può essere calcolato mediante la relazione:

$$h_{g,T} = \varepsilon_g \left(1 - K'_g \log \ln \frac{T}{T-1} \right) \quad (8.4)$$

in cui ε_g e K'_g indicano rispettivamente la moda e la caratteristica della distribuzione della variabile h_g .

Nota la superficie S del bacino, si deduce in maniera immediata il valore di δ_g che corrisponde al valore di S e, quindi, il valore di

$$a_{g,T} = \delta_g \cdot H_{g,T} \quad (8.5)$$

L'analisi è condotta in due fasi successive; in una prima fase si dovrebbe:

- 1) Suddividere la regione in zone e sottozone pluviometriche;
- 2) Stimare con sufficiente attendibilità, per ogni valore di T, il valore caratteristico $h_{g,T}$ del bacino;
- 3) Stimare $\bar{\varepsilon}_g$ e $\overline{K'_g}$ che caratterizzano la funzione di ripartizione $\Phi(H_g)$;

nella seconda fase:

- 4) Individuare all'interno della regione bacini di superficie S diversa, e stimare la media h_m delle altezze di pioggia caduta giorno per giorno nei pluviometri installati nei bacini;
- 5) Assumere come stima di a_g il massimo annuale $h_{m,g}$ delle h_m .
- 6) Assumere come stima di $\delta_{g,T}$, per ciascun bacino:

$$d_{g,T} = \frac{h_{m,g,T}}{H_{g,T}} \quad (8.6)$$

- 7) Mettere a confronto i valori assunti da questo rapporto con quelli della superficie S del bacino cui ciascuno di essi corrisponde.

In base ai risultati dello studio dell'U.S. Weather Bureau e delle indagini condotte sul bacino dei R.Lagni, sembra legittimo affermare che le metodologie adottate e le conclusioni in riguardo alle piogge giornaliere valgono anche quando ci si riferisca a piogge di durata t minore del giorno.

8.2 ANALISI DI CONGRUENZA DEI DATI

Avendo a disposizione i due database, si confrontano i valori di precipitazione registrati su finestra mobile di h_{24} del database I²-RED con quelli registrati su finestra fissa di durata giornaliera h_g del nuovo database Giornaliere. Questo procedimento è possibile solamente su 1348 stazioni presenti in entrambi i database con anni comuni. L' h_{24} , essendo su finestra mobile, a rigor di logica dovrebbe essere più alto del h_g ; si valuta per ogni singola stazione, anno per anno, se sono presenti anni in cui l' h_g risulta essere maggiore dell' h_{24} ; quindi, si ricercano le eventuali irregolarità presenti.

Il controllo si esegue mediante la scrittura di un codice su Matlab che identifichi sempre stazione per stazione, anno per anno, le situazioni in cui $h_g > h_{24}$; si salvano in una variabile le stazioni ed il numero di volte in cui ciò accade.

Il numero di superamenti ottenuti per ogni stazione viene mostrato in Figura 8.1.

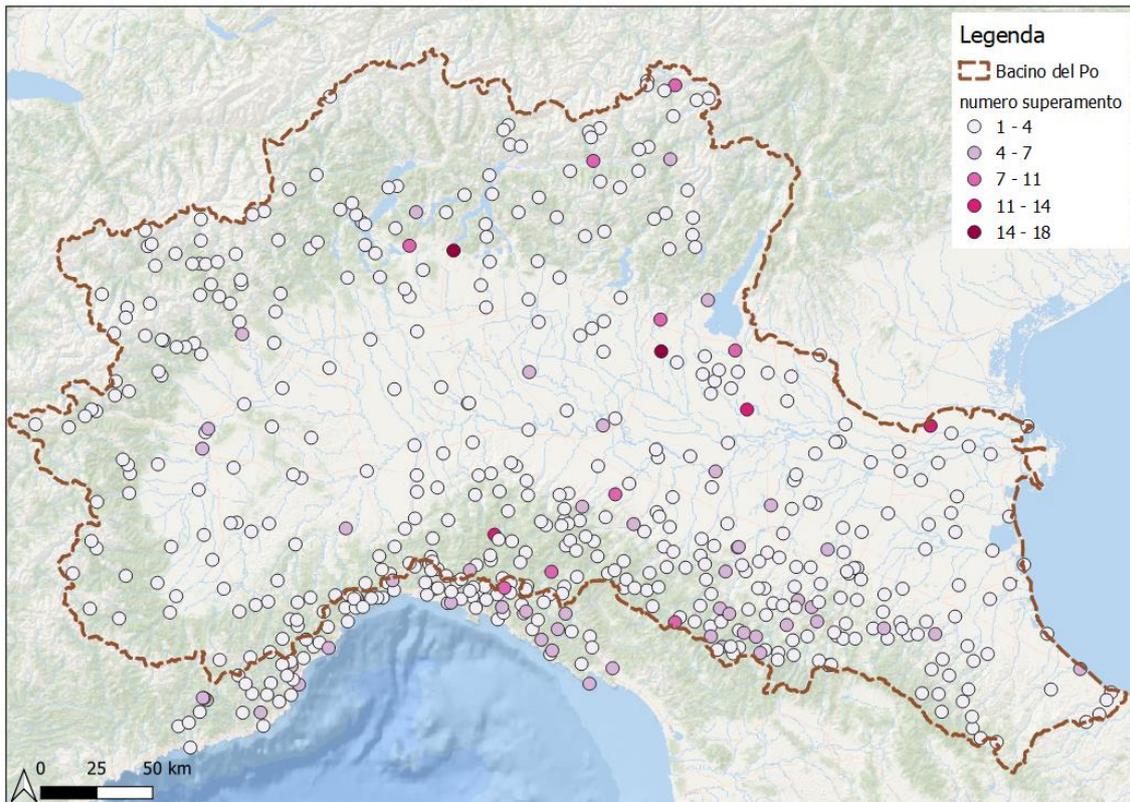
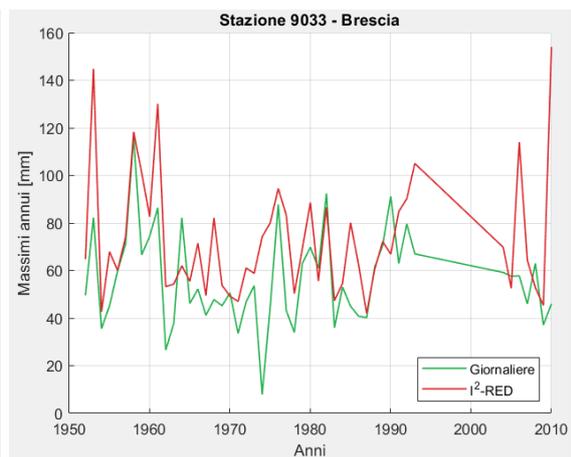
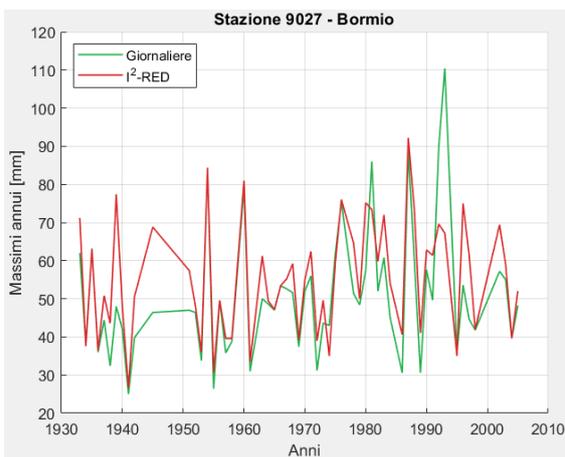
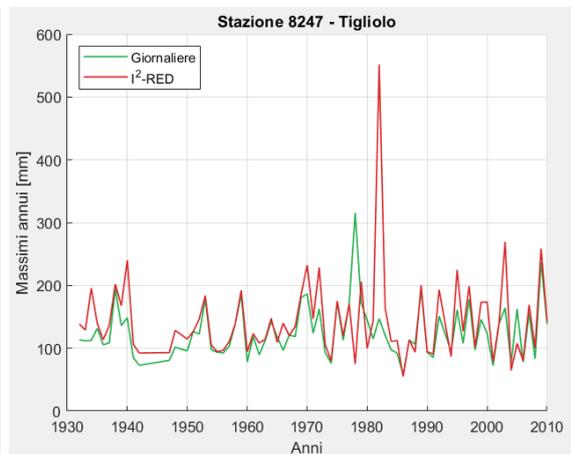
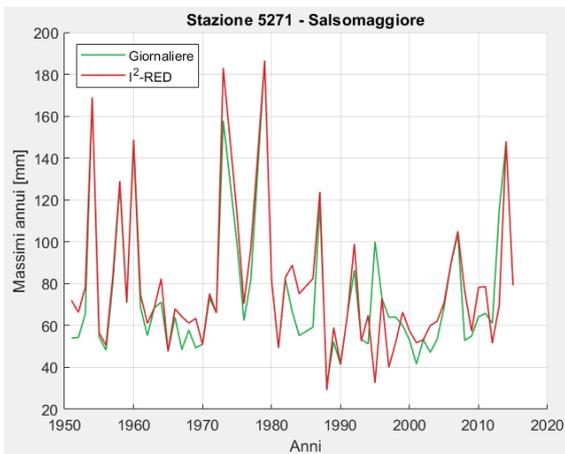
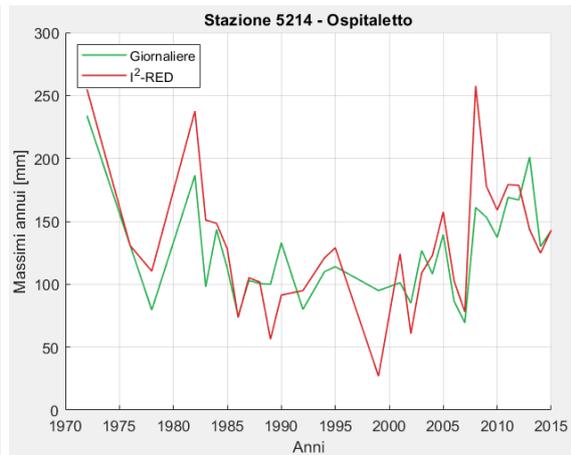
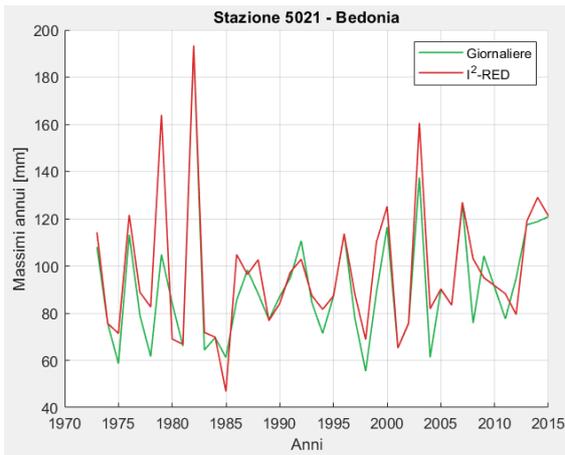


Figura 8.1 - Distribuzione spaziale del numero di superamento di h_g su h_{24}

8.2.1 CONFRONTO TRA MASSIMI ANNUALI GIORNALIERI E DI 24 ORE

Si sono plottati sullo stesso grafico in funzione del tempo, per le stazioni che presentano più anomalie in riferimento alla Figura 8.1, dalla classe 7-11 a salire, con la linea verde le serie storiche dei massimi annui giornalieri, del database Giornaliere, con la linea rossa le serie storiche dei massimi di 24h, del database I²-RED (Figura 8.2, 8.3 e 8.4).

– Numero di superamenti compresi nella classe 7-11:



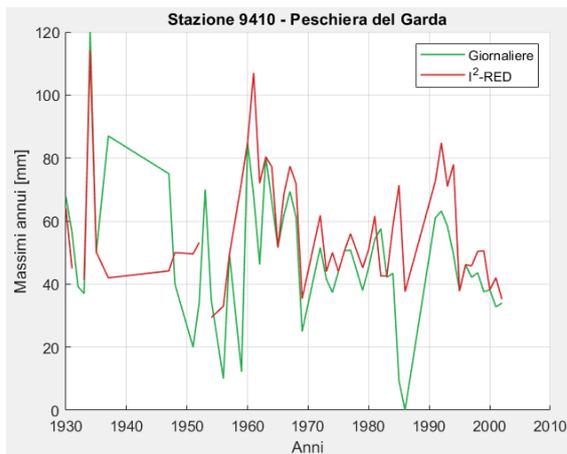
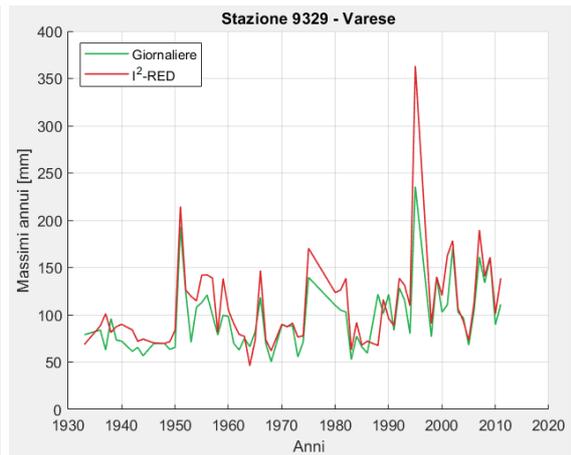
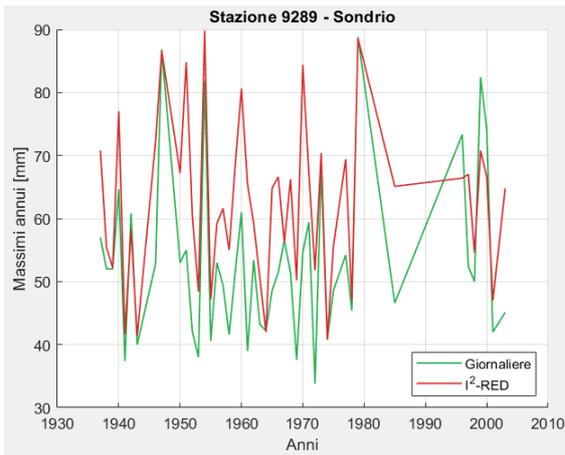
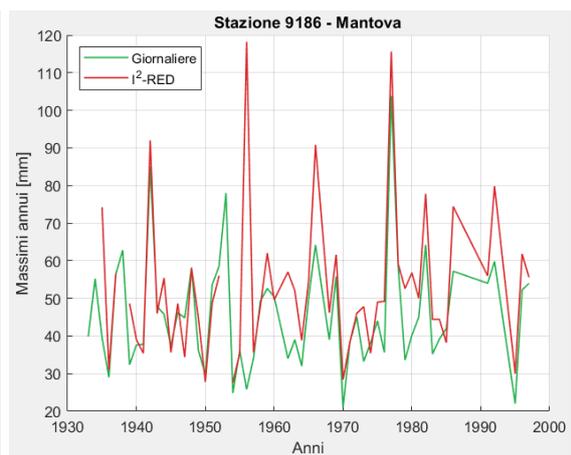
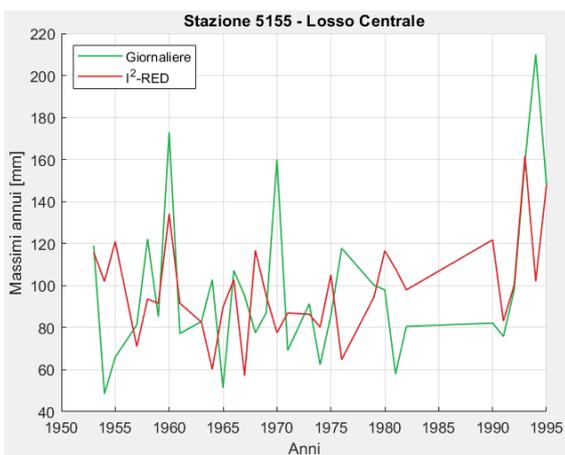


Figura 8.2 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della classe 7-11

– Numero di superamenti compresi nella classe 11-14:



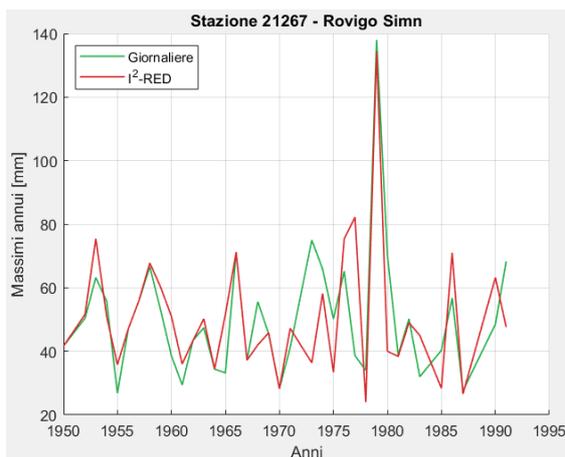


Figura 8.3 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della classe 11-14

– Numero di superamenti compresi nella classe 14-18:

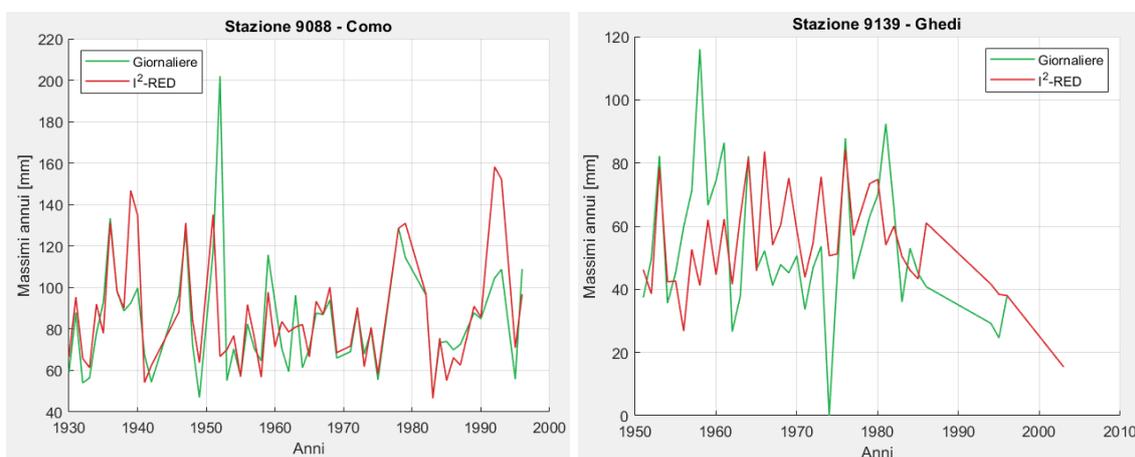


Figura 8.4 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della classe 14-18

Si analizzano i dati nello specifico degli anni in cui è presente l'errore, cioè $h_g > h_{24}$, ipotizzando errori nei dati grezzi o dei valori giornalieri o dei valori di 24h; si procede alla verifica.

Per le 8 stazioni lombarde si controllano i dati presenti in *ARPA Lombardia*: si sono scaricati stazione per stazione i file .rar, si sono analizzati i file .csv contenenti informazioni di precipitazioni giornalieri, calcolando per gli anni di interesse il massimo valore di precipitazione per poterlo confrontare con i dati giornalieri di Giornaliere e quelli di 24h di I²-RED: solo per la stazione 9033 'Brescia' il dato non conferma i giornalieri, per le altre 7 il dato conferma i valori più alti dei giornalieri rispetto alle 24h. Si riporta il caso della stazione 9033 'Brescia', anno di riferimento 1990, con la conferma del valore errato del giornaliero (Figura 8.5 e 8.6).

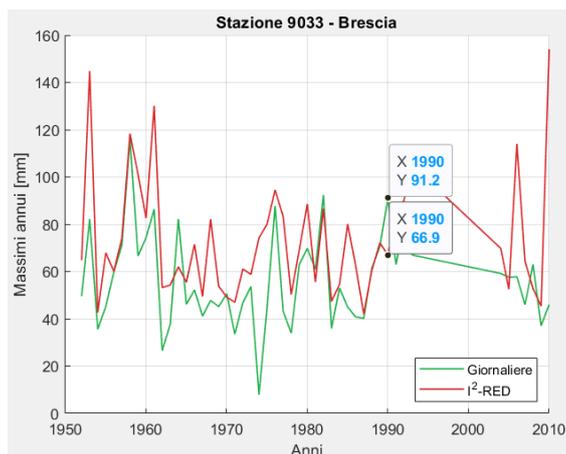


Figura 8.5 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della stazione 9033

1	SiteCode	DataValue	LocalDateTime	UTCOffset	VariableCc	QualityControlLevelCode
35041	BRESCIA	0.8	09/12/1990 09:00		1 Precipitation	
35042	BRESCIA	64.2	10/12/1990 09:00		1 Precipitation	
35043	BRESCIA	5.6	11/12/1990 09:00		1 Precipitation	

Figura 8.6 - Verifica del valore massimo annuo per la stazione 9033 anno 1990

Di seguito un caso esemplificativo del valore giornaliero esatto, il caso della stazione 9088 'Como', anno di riferimento 1952, con la conferma del valore esatto del giornaliero (Figura 8.7 e 8.8).

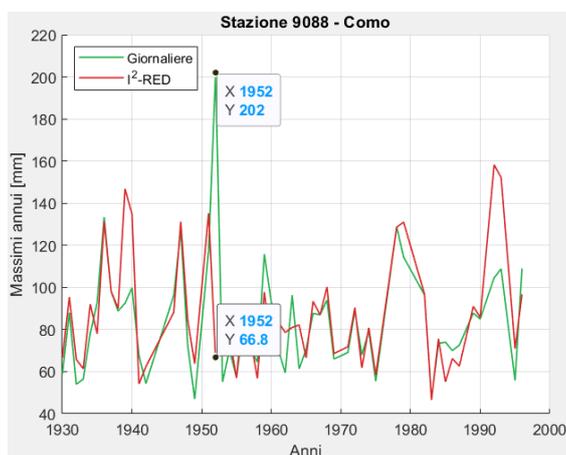


Figura 8.7 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della stazione 9088

1	SiteCode	DataValue	LocalDateTime	UTCOffset	VariableCc	QualityControlLevelCode
14727	COMO	0	26/04/1952 09:00		1 Precipitati	1
14728	COMO	202	27/04/1952 09:00		1 Precipitati	1
14729	COMO	0	28/04/1952 09:00		1 Precipitati	1

Figura 8.8 - Verifica del valore massimo annuo per la stazione 9088 anno 1952

Ulteriore verifica è eseguita dal sito di *ARPA Lombardia*: richiesti stazione per stazione i file .csv contenenti precipitazioni sub-giornaliere, si sono calcolate le cumulate giornaliere, il massimo annuo di precipitazione per poterlo confrontare con i valori giornalieri ed orari; nelle Tabelle 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4 sono riportati i risultati dei controlli per le stazioni presenti e gli anni in comune.

Tabella 8.1 - Confronto e controllo dei dati con ARPA Lombardia della stazione 9027

STAZIONE 9027 - Bormio			
Anno	Giornaliere [mm]	I ² -RED [mm]	ARPA [mm]
1995	35.8	35	32.3

Tabella 8.2 - Confronto e controllo dei dati con ARPA Lombardia della stazione 9033

STAZIONE 9033 - Brescia			
Anno	Giornaliere [mm]	I ² -RED [mm]	ARPA [mm]
2005	57.6	52.6	44
2008	63	52.8	51.6

Tabella 8.3 - Confronto e controllo dei dati con ARPA Lombardia della stazione 9289

STAZIONE 9289 - Sondrio			
Anno	Giornaliere [mm]	I ² -RED [mm]	ARPA [mm]
1999	82.4	70.8	115.8
2000	74.2	66.6	74.8

Tabella 8.4 - Confronto e controllo dei dati con ARPA Lombardia della stazione 9329

STAZIONE 9329 - Varese			
Anno	Giornaliere [mm]	I ² -RED [mm]	ARPA [mm]
2004	96.8	93.4	90.6

Per l'unica stazione della Liguria, la 8247 'Tigliolo', si visionano i dati presenti sul sito della *Regione Liguria*: il dato conferma i valori esatti di 24h di I²-RED (Figura 8.9 e 8.10, es. anno 1978).

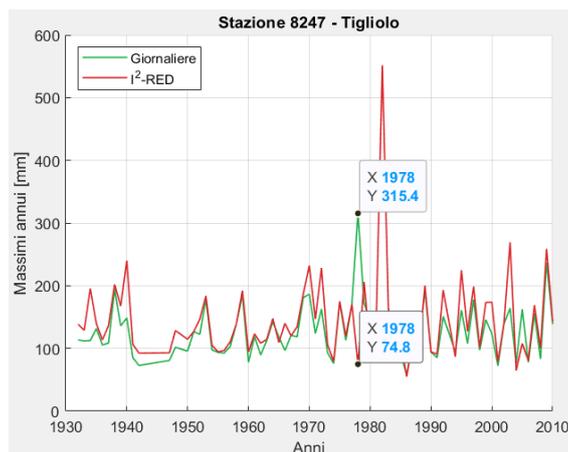


Figura 8.9 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della stazione 8247

Anno	Durate, [ore]
	24
1977	170.6
1978	74.8
1979	206.0

Figura 8.10 - Verifica del valore massimo annuo per la stazione 8247 anno 1978

Per l'unica stazione veneta, 21267 'Rovigo Simn', si sono controllati i dati presenti in *ARPA Veneto*, ma la stazione non è presente.

Per le 4 stazioni dell'Emilia-Romagna, si visionano i dati presenti negli Annali disponibili in *Arpae Emilia-Romagna*, anno per anno, senza alcun riscontro per le stazioni di interesse; si consulta 'dext3r' di *Arpae Emilia-Romagna*, ottenendo, a seguito di richiesta, i file .csv delle precipitazioni giornaliere delle 3 stazioni disponibili (non è presente la stazione 5214 "Ospitaletto"); dopo l'analisi ed il calcolo del massimo giornaliero, tutti i controlli confermano i dati relativi alle 24h, ad eccezione di due casi: il dato si discosta dai valori dei due database o si colloca a metà dei due (come nell'esempio in Figura 8.11).

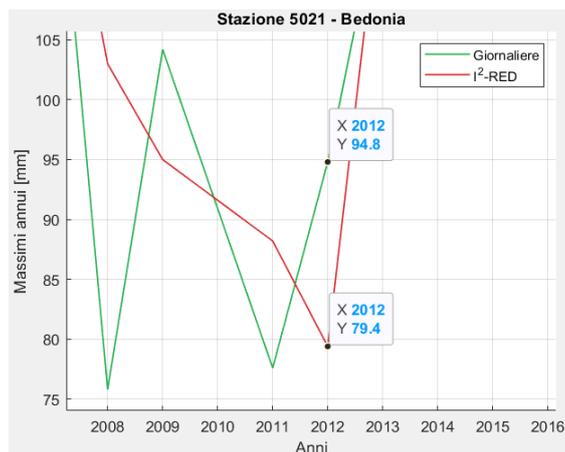


Figura 8.11 - Confronto massimi annui giornalieri e di 24h della stazione 5021

Si riportano nelle Tabelle 8.5, 8.6 e 8.7 i dati del confronto e controllo eseguiti, per gli anni disponibili sulla piattaforma dell'Arpae per le 3 stazioni.

Tabella 8.5 - Confronto e controllo dei dati con Arpae della stazione 5021

STAZIONE 5021 - Bedonia			
Anno	Giornaliere [mm]	I ² -RED [mm]	Arpae [mm]
2009	104.2	95	98.4
2012	94.8	79.4	71.2

Tabella 8.6 - Confronto e controllo dei dati con Arpae della stazione 5271

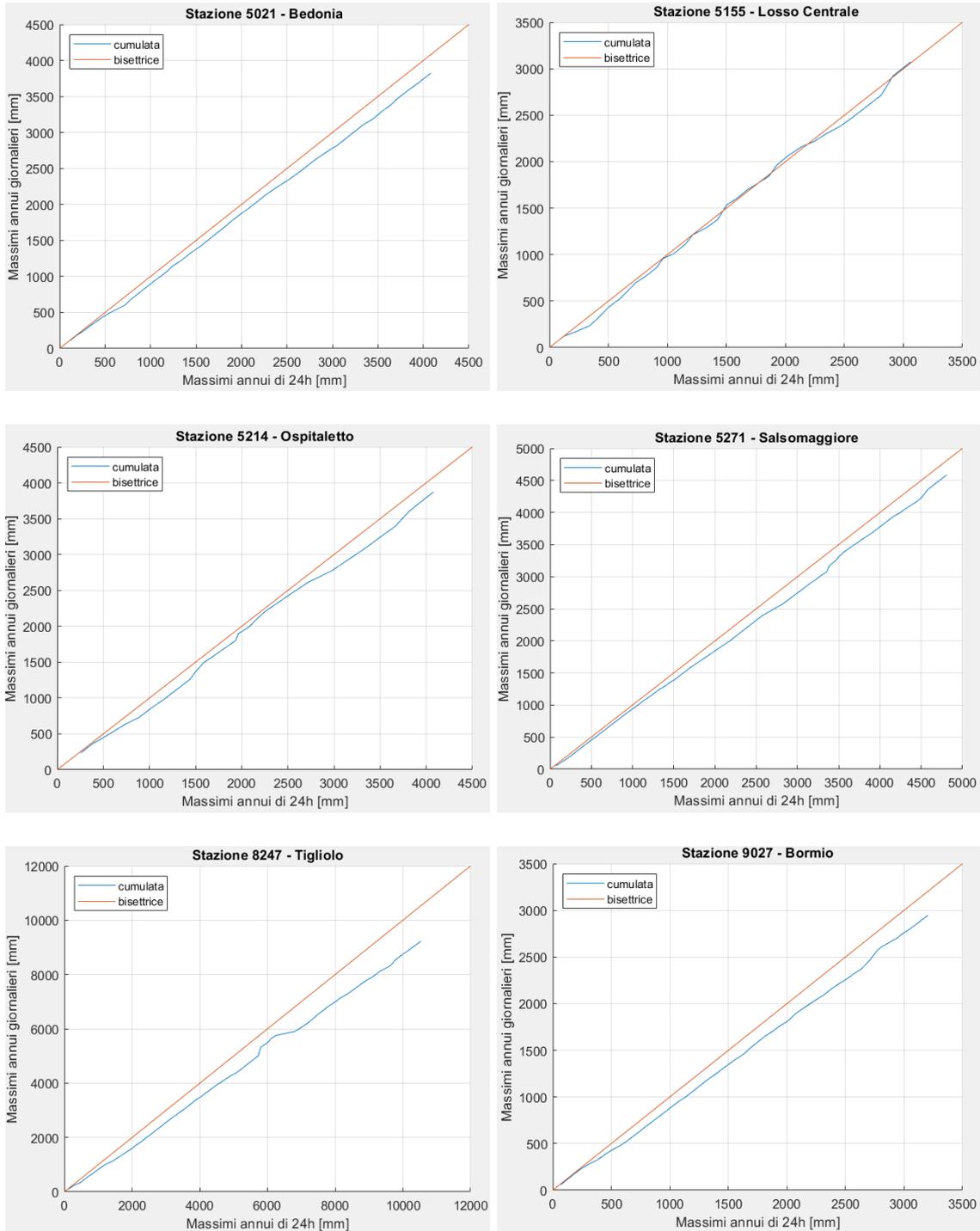
STAZIONE 5271 - Salsomaggiore			
Anno	Giornaliere [mm]	I ² -RED [mm]	Arpae [mm]
2012	61	51.6	37.8

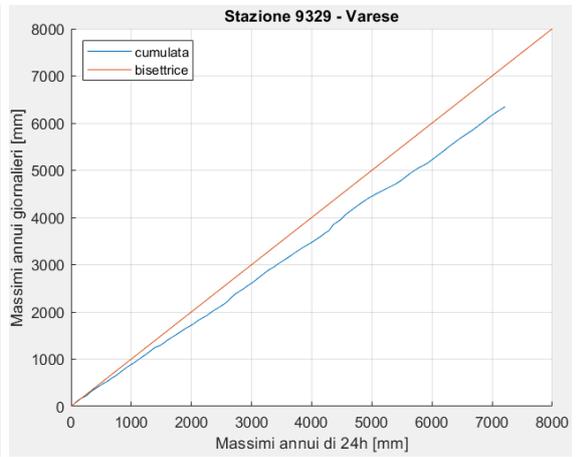
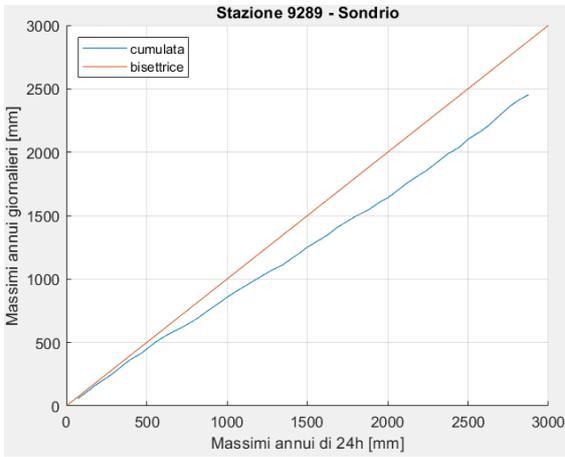
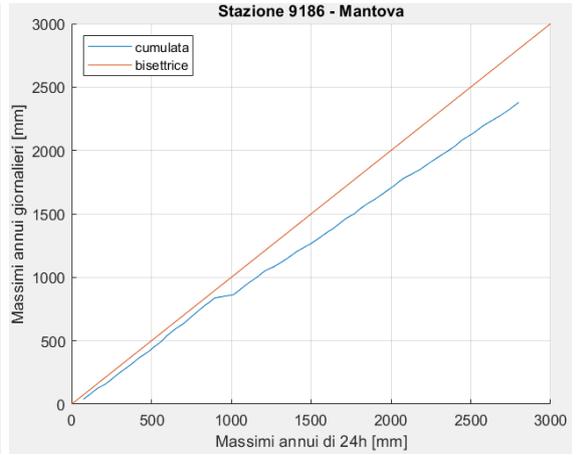
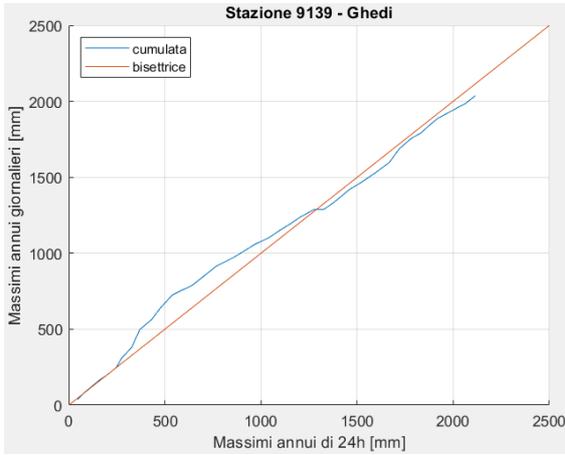
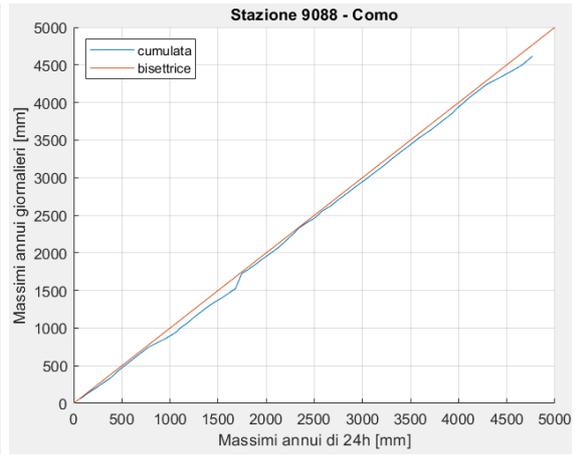
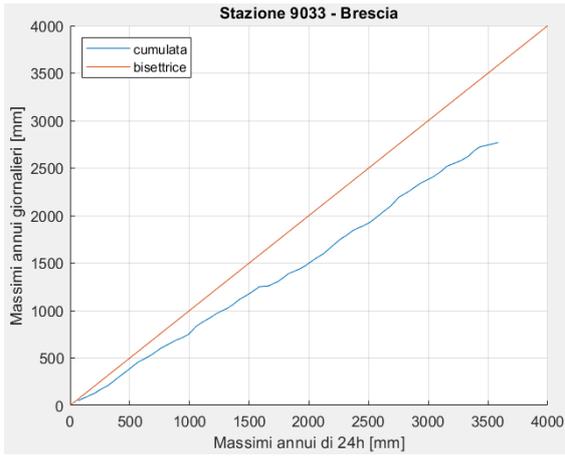
Tabella 8.7 - Confronto e controllo dei dati con Arpae della stazione 5155

STAZIONE 5155 - Losso_Centrale			
Anno	Giornaliere [mm]	I ² -RED [mm]	Arpae [mm]
1994	210	102	101.8

Mediante uno script di Matlab, si calcolano, per le 14 stazioni con numero di superamento h_g rispetto a h_{24} maggiore di 7, le cumulate delle due serie storiche, dati giornalieri di Giornaliere e quelli di 24h di I²-RED, seguendo il criterio della Doppia cumulata (Double Mass Function): per ciascun anno in un piano cartesiano si pongono in ascissa i valori della somma progressiva delle massime precipitazioni annue di 24h [mm] e in ordinata i valori della somma progressiva delle massime precipitazioni annue giornaliere [mm]. Si

riportano nella Figura 8.12 i grafici dove la doppia cumulata (o double-mass function) è rappresentata in colore blu e la bisettrice, per vedere quanto si discostano le due misure, in colore rosso.





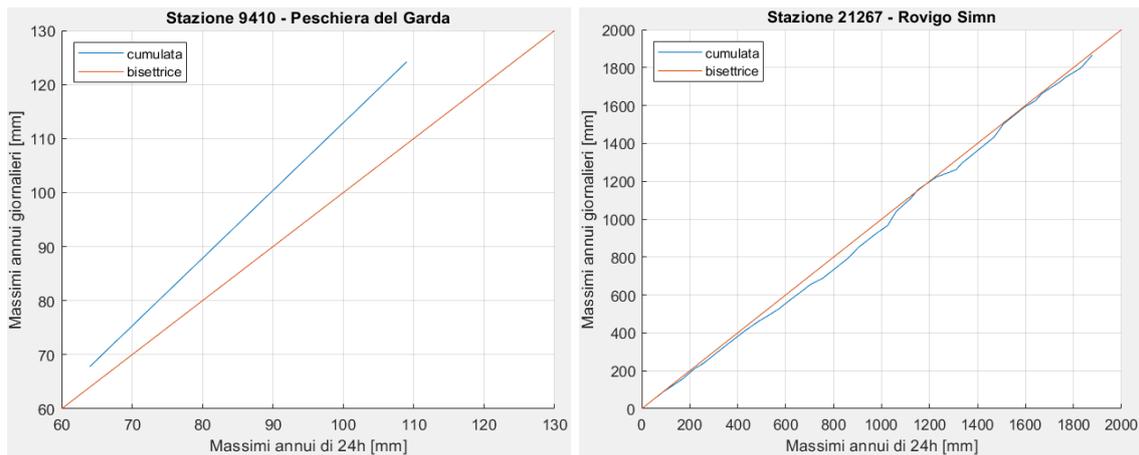


Figura 8.12 - Doppia cumulata delle stazioni con alto numero di superamento di h_g su h_{24}

Per poter proseguire, si rende necessario utilizzare le informazioni pervenute dai precedenti controlli e migliorare il dato di precipitazione: se si ha una conferma del dato giornaliero sia da una fonte di dati giornalieri sia da una fonte di dati sub-giornalieri, si conferma il dato; se si ha una conferma solamente dalla fonte giornaliera, tenendo conto del fatto che i dati sub-giornalieri sono registrati direttamente dal dispositivo e i dati giornalieri derivano da una fase di processamento, allora si preferisce dare un'importanza maggiore al dato sub-giornaliero, confermando le sue indicazioni.

Si procede alla modifica manuale dei dati giornalieri che non hanno una conferma da entrambe le fonti di dato.

Per le altre stazioni, con numero di superamento minore di 7, mediante uno script di Matlab, vengono rilevate le anomalie, analizzati i dati grezzi a disposizione, si procede ad una verifica più speditiva, modificando il dato anomalo del giornaliero con il dato effettivo misurato dal sub-giornaliero di 24h.

8.3 CALCOLO DEL FATTORE DI HERSHFIELD

Mediante un ulteriore script di Matlab, viene calcolato per ogni stazione e per ogni anno, seguendo l'equazione 8.1, il fattore di Hershfield:

$$H_{Hershfield} = \frac{h_{24}}{h_g} \quad (8.7)$$

Successivamente è calcolato il valore medio e il coefficiente di variazione del fattore di Hershfield per ogni stazione, ottenendo mappe di rappresentazione spaziale dei valori ottenuti (Figura 8.13 e 8.14).

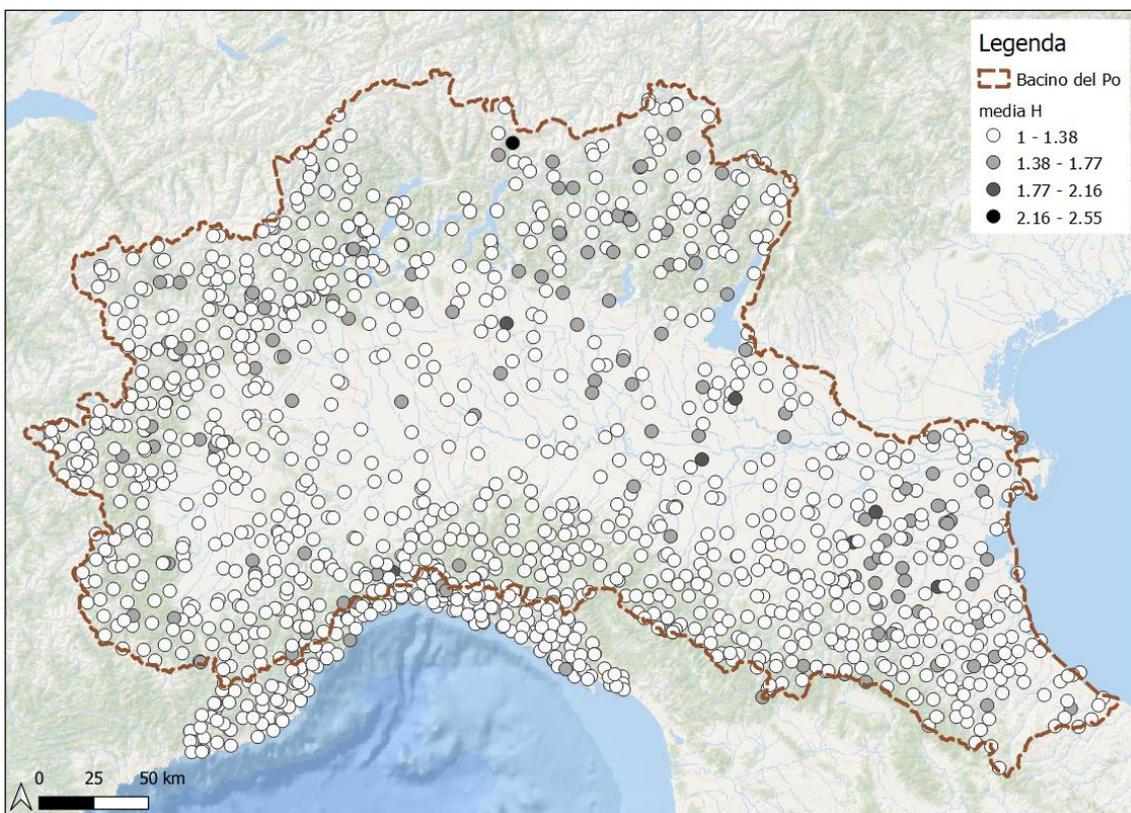


Figura 8.13 - Distribuzione spaziale della media del fattore di Hershfield iniziale

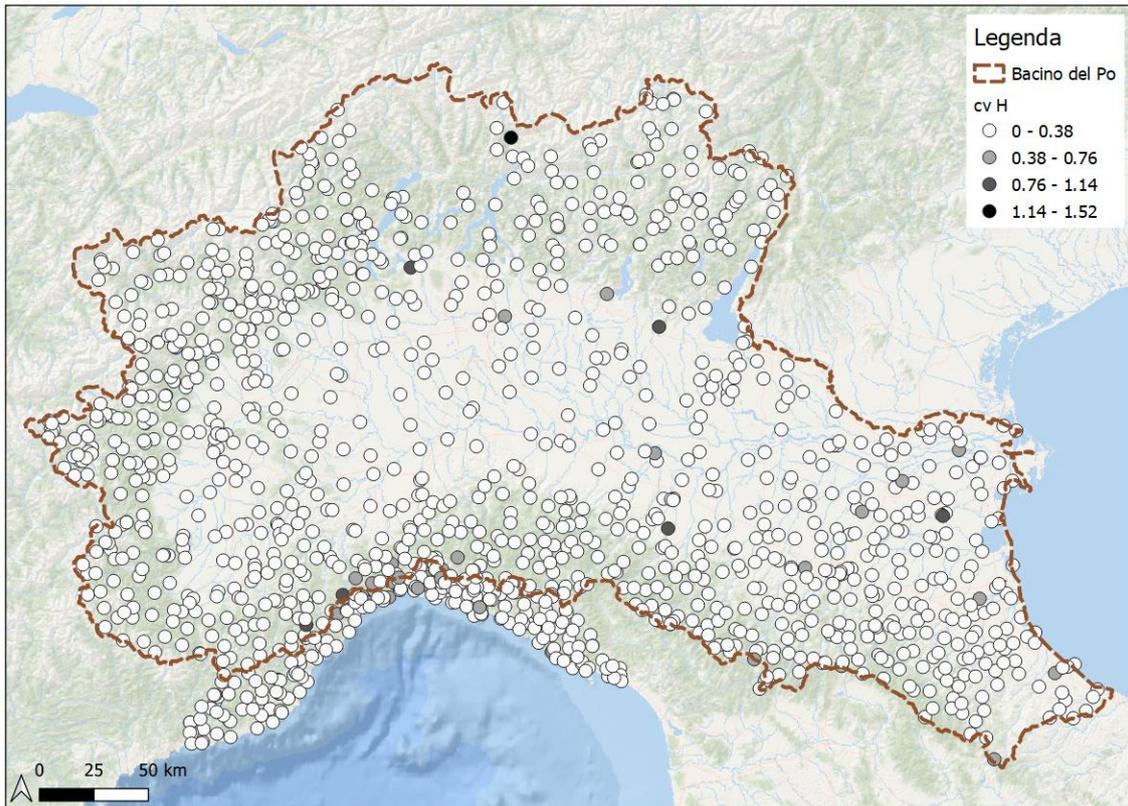


Figura 8.14 - Distribuzione spaziale del coefficiente di variazione iniziale del fattore di Hershfield

Per rappresentare in modo sintetico l'insieme delle osservazioni della media e del coefficiente di variazione di H vengono riportate le loro distribuzioni di frequenza, avendo definito 10 intervalli di classe (Figura 8.15).

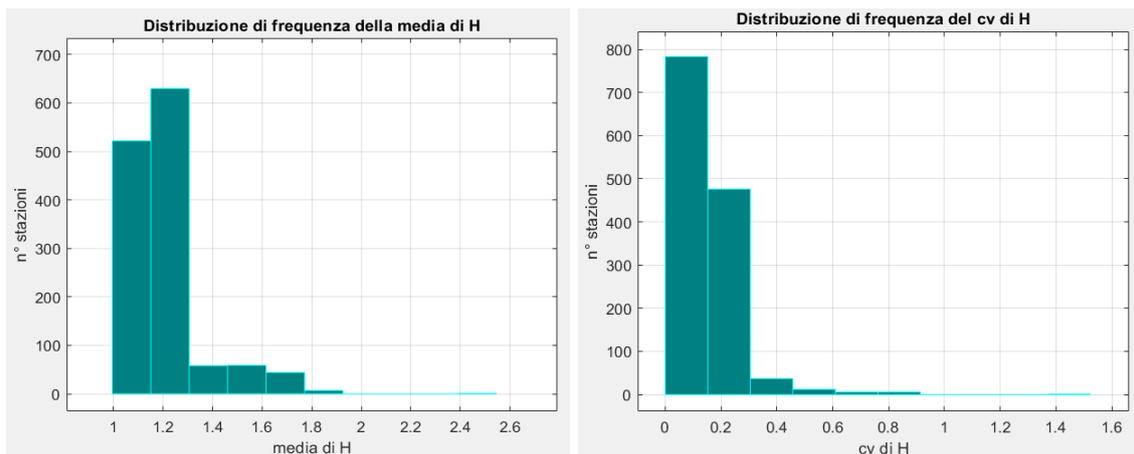


Figura 8.15 - Distribuzione di frequenza della media e del coefficiente di variazione iniziale del fattore H

Mediante uno script di Matlab si è mappata per ogni anno la distribuzione spaziale di H e si è ricavata la distribuzione di frequenza; mentre la distribuzione spaziale muta al

variare del numero di stazioni negli anni, quella di frequenza non subisce grosse variazioni (Figura 8.16).

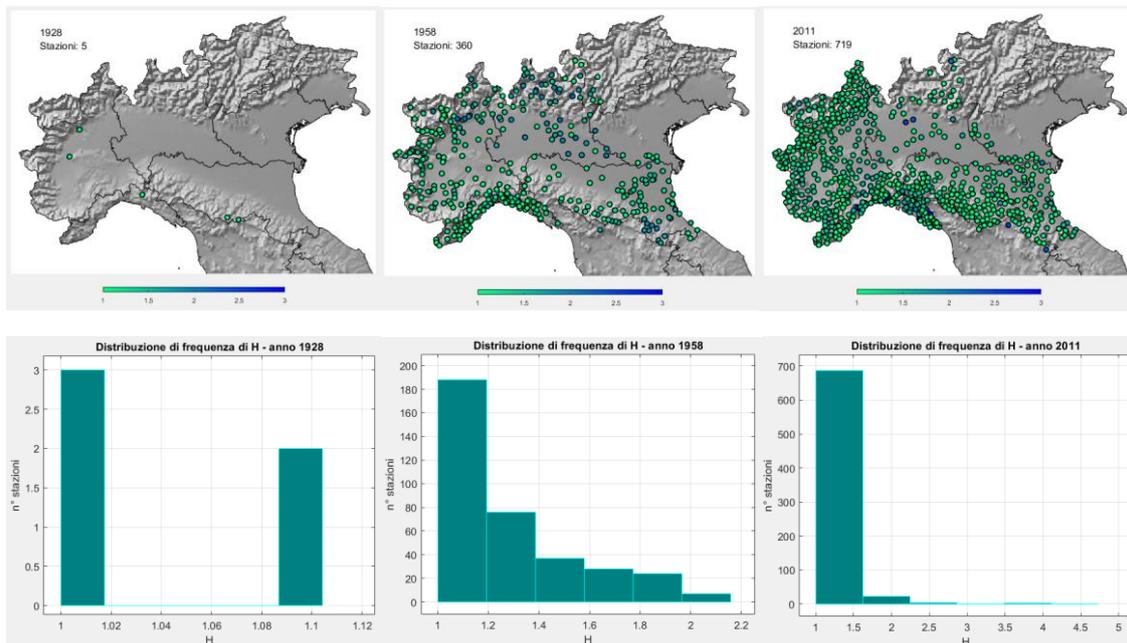


Figura 8.16 - Distribuzione spaziale e di frequenza di H del 1928, 1958 e 2011

Analizzando i grafici ottenuti anno per anno, è stato possibile notare alcuni valori di H molto alti, variabili da 5 a 14 (in Figura 8.17 viene riportato a titolo di esempio l'anno 1995). Vengono identificati 10 anni di stazioni che presentano il problema: i valori dei giornalieri sono per esempio 16.2, 17.4 [mm] a fronte dei sub-giornalieri rispettivamente di 83.4, 99.8 [mm]; vengono cancellati poiché ritenuti privi di senso, con errori presumibilmente dovuti a qualche fase di trascrizione, trasmissione o trasformazione preliminare dei dati grezzi.

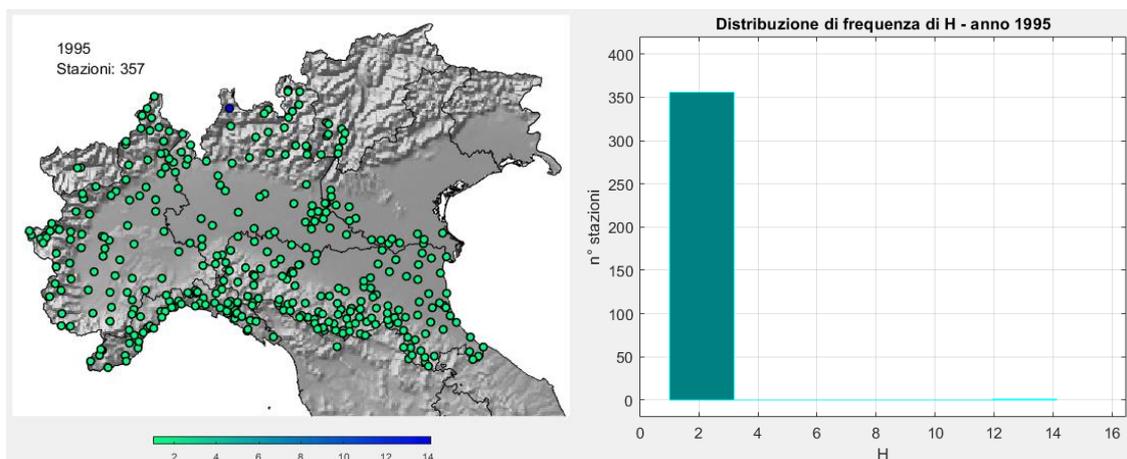


Figura 8.17 - Distribuzione spaziale e di frequenza di H del 1995

Nella Figura 8.18 e 8.19 si riportano le nuove mappe di distribuzione spaziale dopo le modifiche apportate.

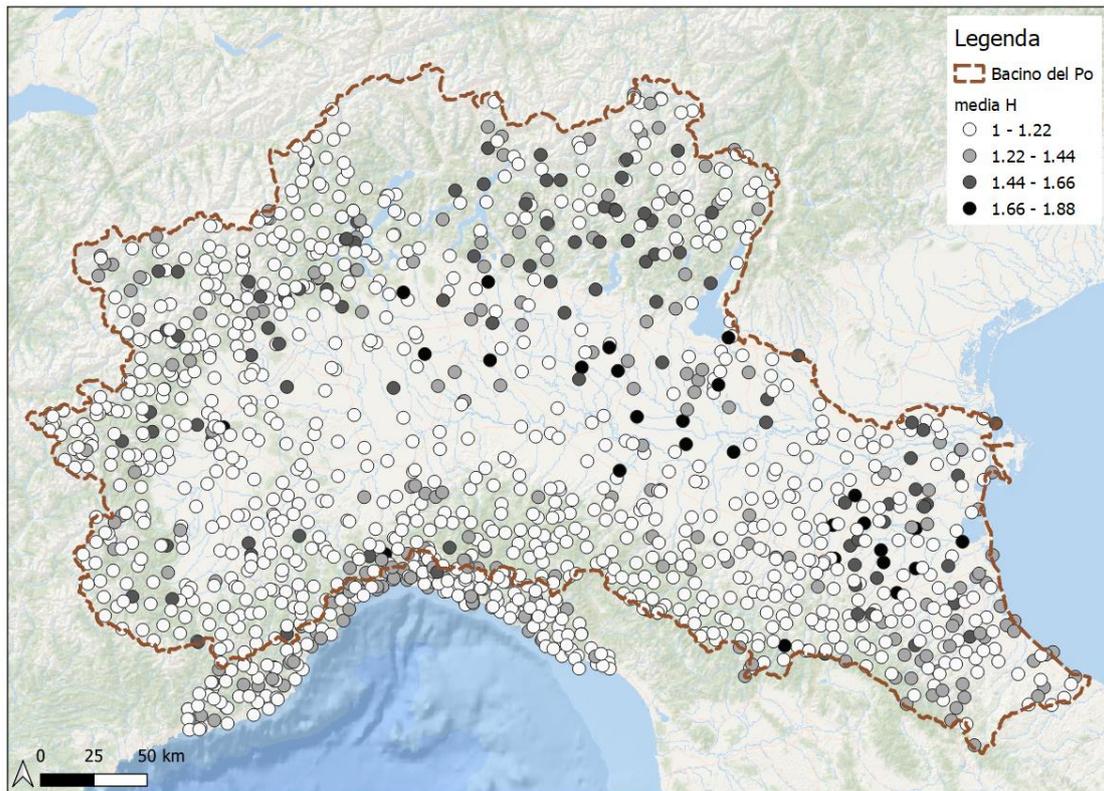


Figura 8.18 - Distribuzione spaziale finale della media del fattore di Hershfield

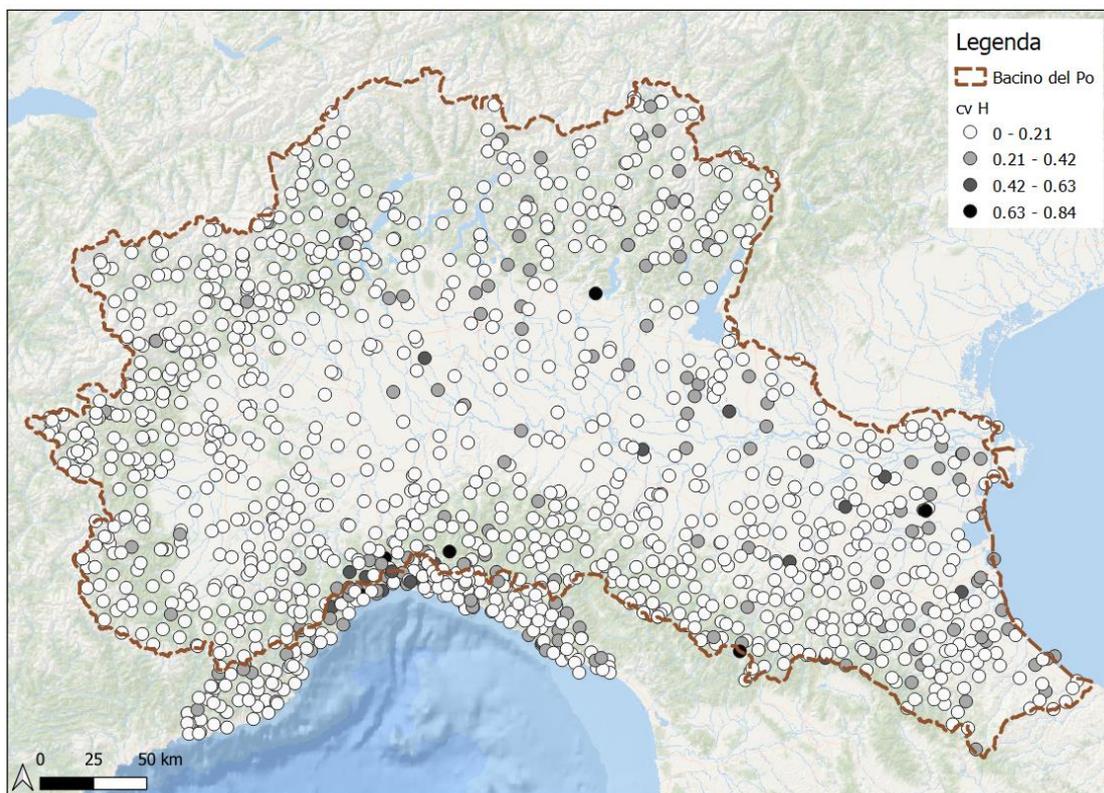


Figura 8.19 - Distribuzione spaziale finale del coefficiente di variazione del fattore di Hershfield

Infine, sono riportate le nuove distribuzioni di frequenza della media e del coefficiente di variazione di H, definendo 10 intervalli di classe (Figura 8.20).

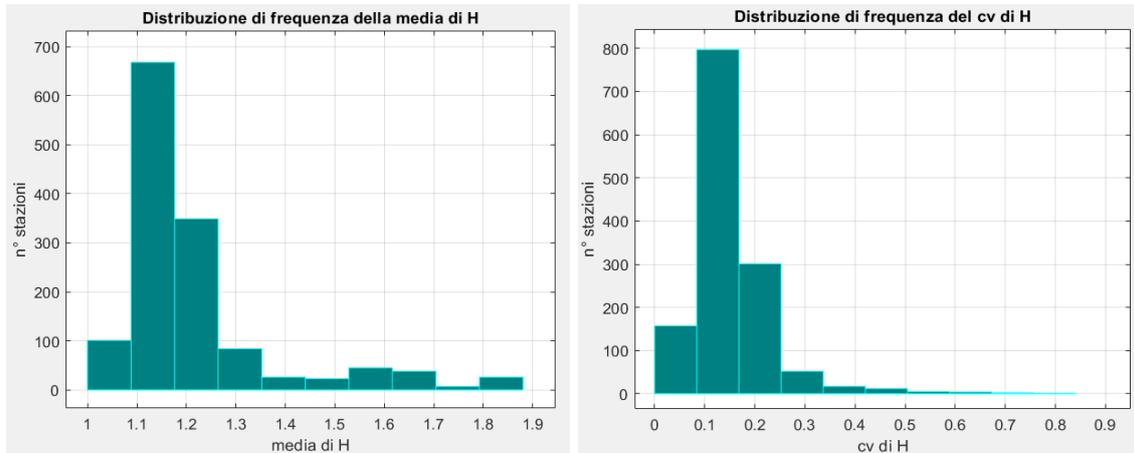


Figura 8.20 - Distribuzione di frequenza della media e del coefficiente di variazione finale del fattore H

Il risultato ottenuto dall'elaborazione del fattore di Hershfield sul bacino del Po stima in media il fattore H pari a 1.2 e il valore della mediana di 1.16.

Si è ricavata la mappa dell'interpolazione spaziale della media del fattore H (Figura 8.21) attraverso l'utilizzo della procedura automatica basata sulla funzione *autoKrige* del pacchetto *automap* di R. Per l'elaborazione si specifica il tipo di Kriging, la griglia di interpolazione ed è richiesto il dato di input:

- ID delle stazioni;
- coordinate geografiche;
- valori della media di H delle singole stazioni.

La mappa è stata derivata con una risoluzione di 250 metri utilizzando un Kriging Ordinario con variogrammi generati automaticamente utilizzando *autofitVariogram*.

Una particolare osservazione è rivolta all'area della Svizzera con assenza di dati che ricade all'interno del bacino del Po: il Kriging restituisce comunque un'interpolazione dei dati, pari alla media delle stazioni nelle vicinanze, che però risulta non attendibile.

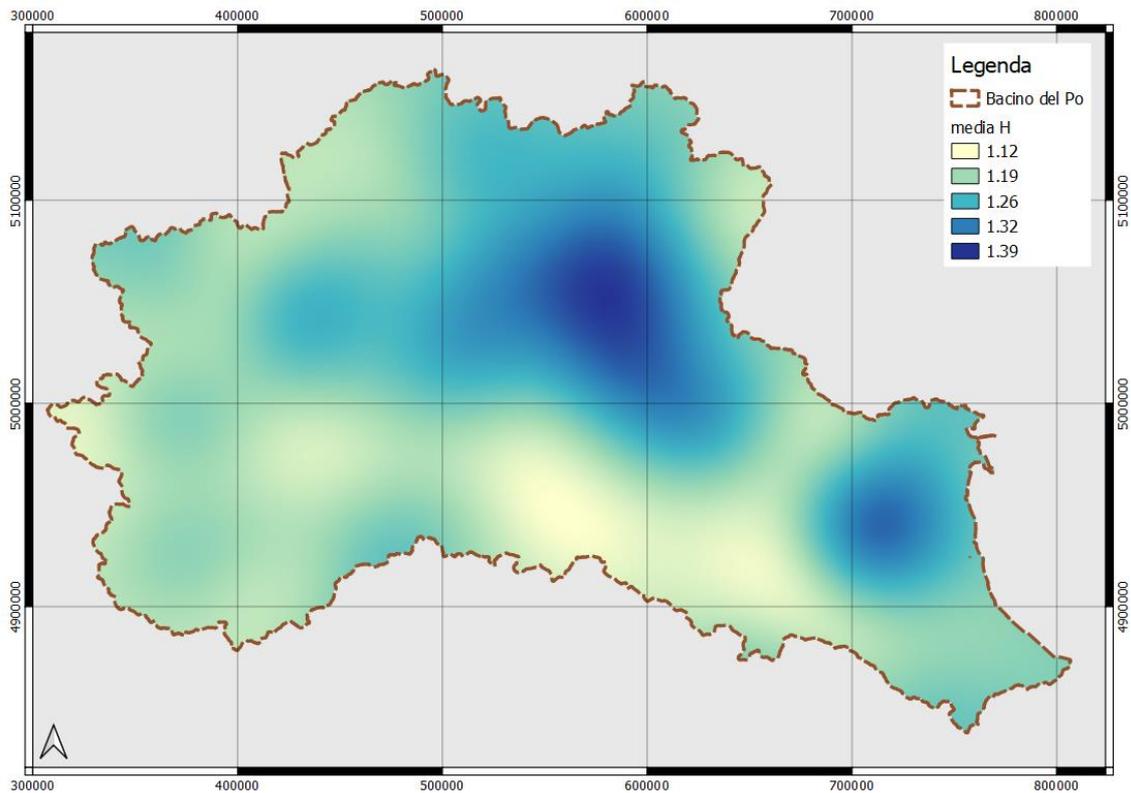


Figura 8.21 - Interpolazione spaziale della media del fattore H

Dalle mappe della distribuzione e dell'interpolazione spaziale della media del fattore H (Figure 8.18 e 8.21), emerge una concentrazione di valori alti in due zone ben distinte:

- Lombardia, area compresa tra Bergamo e Brescia;
- Emilia-Romagna, area compresa tra Bologna, Ferrara e Ravenna.

8.4 OSSERVAZIONI SU MEDIA E COEFFICIENTE DI VARIAZIONE DEL FATTORE DI HERSHFIELD

Tramite l'utilizzo di boxplot (Figura 8.22) sono stati analizzati i possibili valori assunti dalla media di H. Con tale strumento si può visualizzare in maniera speditiva la mediana e i 25° e 75° percentili della distribuzione dei valori. All'esterno dei baffi del boxplot (che

corrispondono a circa $\pm 2.7\sigma$) sono presenti valori “outlier”. Tali valori sono poi stati investigati, per identificare un possibile legame con la quota.

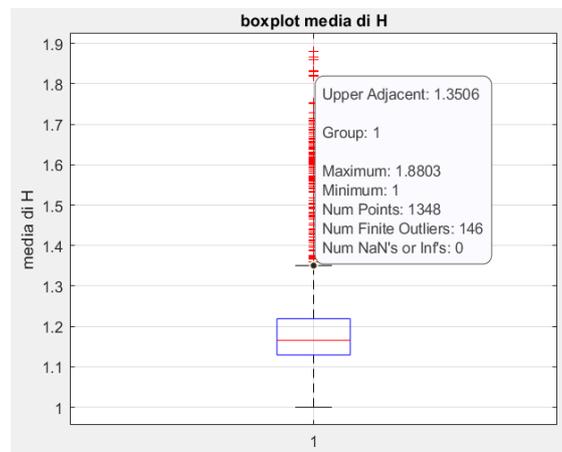


Figura 8.22 - Boxplot della media di H

Vengono identificate 146 stazioni con media di H superiore a 1.35 e in Figura 8.23 sono ripartite in base alla quota.

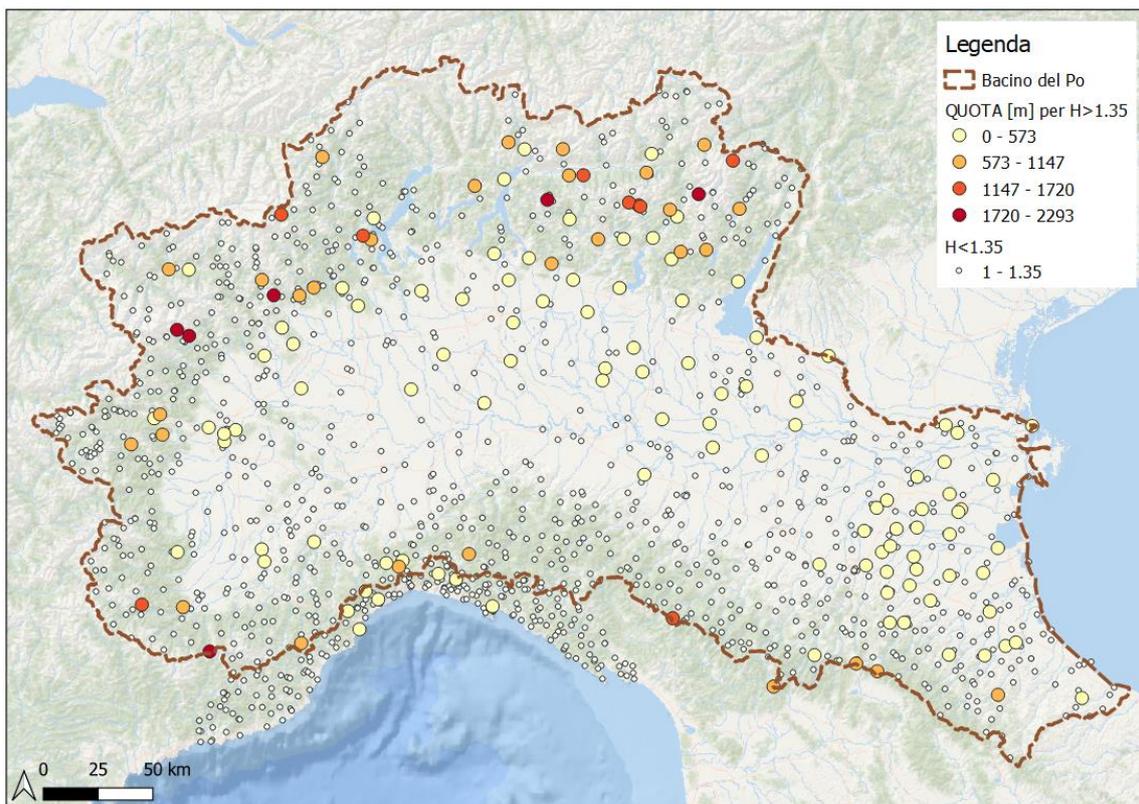


Figura 8.23 - Distribuzione spaziale delle stazioni con media di $H > 1.35$ relazionate con la quota

Nella Figura 8.24 si riportano gli scatter plot che mettono in relazione le media di H con le quote, dapprima considerando tutte le 1348 stazioni e poi solo le 146 con media di H maggiore di 1.35.

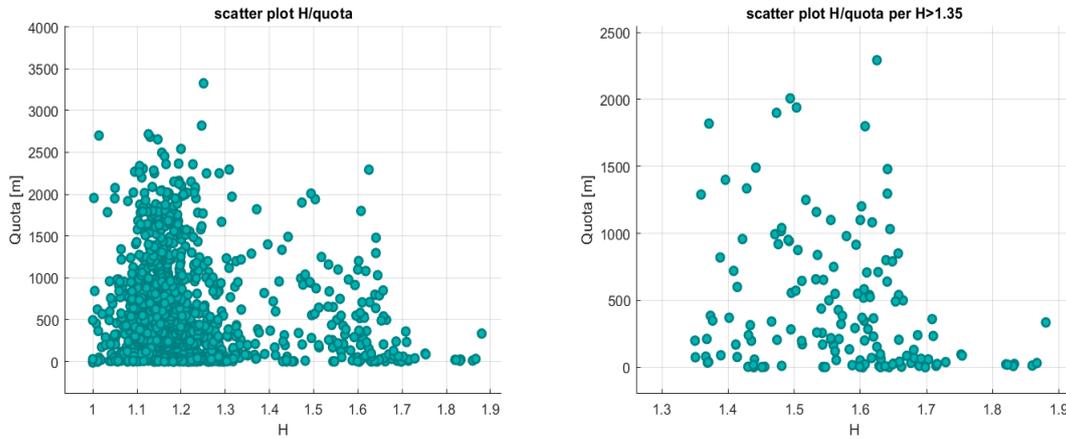


Figura 8.24 - Scatter plot H/quota

Non si riscontrano relazioni con la quota e la geolocalizzazione delle stazioni.

Per avere informazioni sul numero di osservazioni, attraverso il boxplot di Figura 8.25 vengono identificate 71 stazioni con coefficiente di variazione di H superiore a 0.27 e in Figura 8.26 vengono raffigurati con cerchi piccoli, che simboleggiano pochi anni di misurazioni disponibili, i valori alti del coefficiente e con cerchi grandi i valori bassi del coefficiente relativi a tanti anni di misurazioni disponibili.

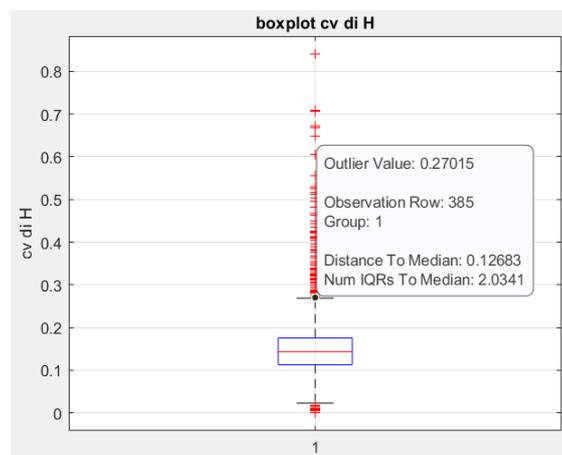


Figura 8.25 - Boxplot del coefficiente di variazione di H

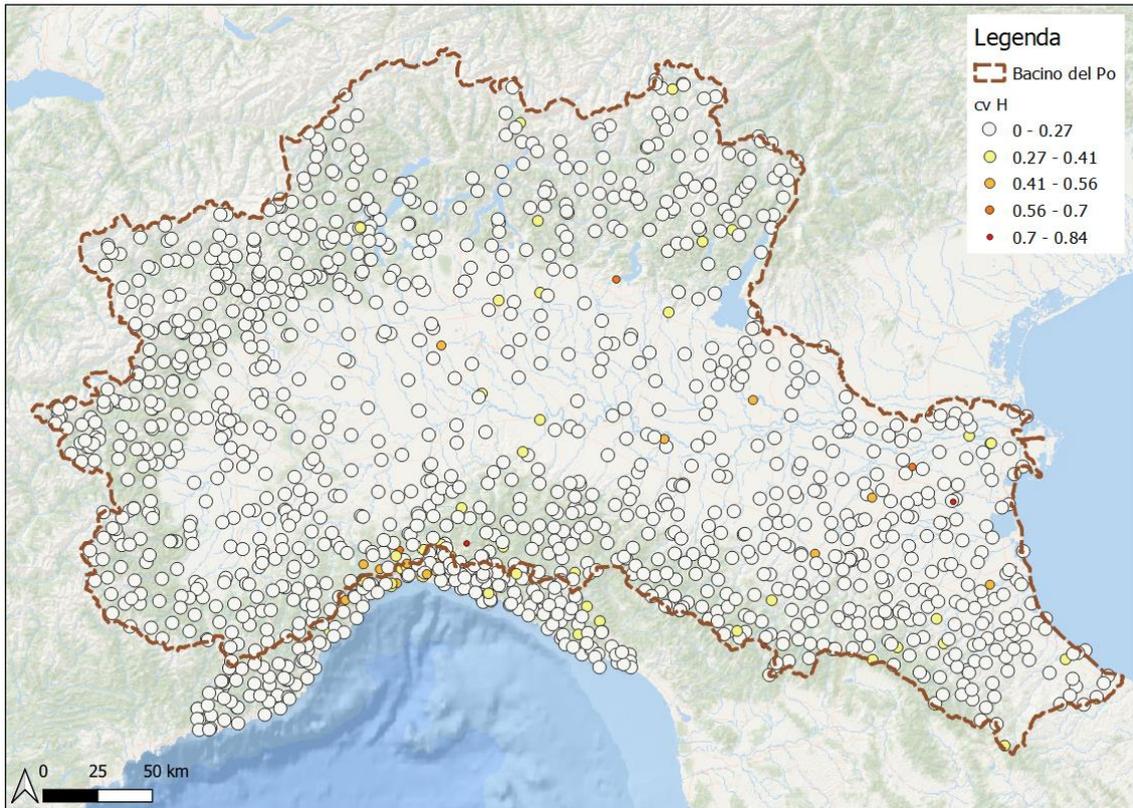


Figura 8.26 - Distribuzione spaziale del coefficiente di variazione di H delle stazioni

La distribuzione spaziale del coefficiente di variazione non mostra nessun collegamento tra valori di H alti e lunghezza delle serie storiche dei massimi.

9. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Questo elaborato illustra tutto il percorso della ricostruzione delle piogge estreme giornaliere sul bacino del fiume Po e dell'analisi del fattore di Hershfield.

Dopo una trattazione delle caratteristiche sul bacino del Po e sugli strumenti di misurazione delle precipitazioni, si è resa necessaria la costruzione di un database delle precipitazioni giornaliere da accostare a quello già esistente delle precipitazioni sub-giornaliere.

I dati, ricavati dalle diverse fonti disponibili e riferiti al periodo dal 1910 al 2019, costituiscono 2635 file di dati grezzi e dopo il processamento 2144 stazioni pluviometriche. Per verificare l'andamento corretto dei dati si è proceduto all'analisi stazione per stazione con diverse modalità di quality control.

Dal database delle precipitazioni giornaliere è stato successivamente derivato il database dei valori massimi annui di precipitazione e mediante le statistiche descrittive si è eseguito il controllo qualità.

L'analisi dei valori di massima precipitazione dei due database è stata effettuata per le 1348 stazioni presenti in entrambi i database con anni comuni: è stato calcolato per ogni stazione e per ogni anno il fattore di Hershfield, notando che la distribuzione spaziale muta al variare del numero di stazioni negli anni, mentre quella di frequenza non subisce grosse variazioni; di seguito è stato calcolato il valore medio e il coefficiente di variazione del fattore di Hershfield per ogni stazione.

La situazione mediana si è dimostrata in linea con quanto elaborato in letteratura (*Papalexidou et al., 2016; Muller et al., 2007*), ottenendo un valore di 1.16 del fattore di Hershfield.

Il 10% del totale delle stazioni, 146 su 1348, ha un valore della media di H elevato, si è cercato un nesso con la quota delle stazioni e con la lunghezza delle serie storiche dei massimi, ma non si è ottenuta alcuna relazione. Avendo indagato su eventuali relazioni con variabili non legate al processo di pioggia, geolocalizzazione e quota, uno degli scopi

futuri è studiare possibili relazioni con variabili legate al processo di pioggia, ad esempio autocorrelazione delle serie temporali giornaliere e frazione di giorni piovosi.

È auspicabile l'estensione di questo lavoro svolto per il bacino del Po all'intero territorio nazionale, ottenendo un database e un'analisi di H rappresentativi di tutta l'Italia.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

APPA Provincia Autonoma di Trento, 2021. Provincia Autonoma di Trento – Agenzia provinciale per la protezione dell’ambiente. Disponibile online: <http://www.appa.provincia.tn.it/> (ultimo accesso 17/06/2021).

ARPA Lombardia, 2021. Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente della Lombardia. Disponibile online: <https://www.arpalombardia.it> (ultimo accesso 16/06/2021).

ARPA Lombardia, 2021. Richiesta dati misurati – Meteorologia | ARPA Lombardia. Disponibile online: <https://www.arpalombardia.it/Pages/Meteorologia/Richiesta-dati-misurati.aspx> (ultimo accesso 06/09/2021).

ARPA Lombardia, 2021. Servizio Idrografico – Misure di portata. Disponibile online: https://idro.arpalombardia.it/manual/dati_storici.html (ultimo accesso 06/09/2021).

ARPA Piemonte, 2021. Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale. Disponibile online: <http://www.arpa.piemonte.it> (ultimo accesso 26/04/2021).

ARPA Valle d’Aosta, 2021. Agenzia Regionale della Protezione dell’Ambiente – Valle d’Aosta. Disponibile online: <https://www.arpa.vda.it/it/> (ultimo accesso 14/05/2021).

ARPA Veneto, 2021. Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto. Disponibile online: <https://www.arpa.veneto.it/> (ultimo accesso 18/06/2021).

ARPA Veneto, 2021. Bollettini – Storico – Precmax. Disponibile online: <https://www.arpa.veneto.it/bollettini/storico/precmax/> (ultimo accesso 09/09/2021).

Arpae Emilia-Romagna, 2021. Annali idrologici — Arpae Emilia-Romagna. Disponibile online: <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/meteo/report-meteo/annali-idrologici> (ultimo accesso 08/09/2021).

Arpae Emilia-Romagna, 2021. Arpae Emilia-Romagna. Disponibile online: <https://www.arpae.it/it> (ultimo accesso 08/06/2021).

Arpae Emilia-Romagna, 2021. dext3r. Disponibile online: <https://simc.arpae.it/dext3r/> (ultimo accesso 08/09/2021).

ARPAL Liguria, 2021. Arpal Liguria – Meteo. Disponibile online: <https://www.arpal.liguria.it/homepage/meteo/analisi-climatologiche/atlante-climatico-della-liguria.html> (ultimo accesso 17/05/2021).

ARPAL Liguria, 2021. Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente ligure. Disponibile online: <https://www.arpal.liguria.it> (ultimo accesso 29/05/2021).

ARPAM Marche, 2021. Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale delle Marche. Disponibile online: <https://www.arpa.marche.it/> (ultimo accesso 20/06/2021).

ARPAT Toscana, 2021. Agenzia regionale per la protezione ambientale della Toscana. Disponibile online: <http://www.arpat.toscana.it/> (ultimo accesso 19/06/2021).

Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po, 2021. Atlanti del Po – Autorità di Bacino del Fiume Po. Disponibile online: <https://adbpo.gov.it/atlanti-del-po/> (ultimo accesso 28/06/2021).

Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po, 2021. Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po. Disponibile online: <https://adbpo.gov.it> (ultimo accesso 28/06/2021).

Blanchet J., Ceresetti D., Molinié G. e Creutin J.-D. (2016). A regional GEV scale-invariant framework for Intensity–Duration–Frequency analysis. *Journal of Hydrology* 540(2016)82–95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.007>

Deutscher Wetterdienst, 2021. Wetter und Klima – Deutscher Wetterdienst – Our services – Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). Disponibile online: <https://www.dwd.de/EN/ourservices/gpcc/gpcc.html> (ultimo accesso 23/08/2021).

GNDICI, 2021. CNR GNDICI – Il progetto VAPI. Disponibile online: http://www.gndici.cnr.it/it/vapi/welcome_it.htm (ultimo accesso 08/07/2021).

Idrologia Polito, 2021. Idrologia@polito. Disponibile online: http://www.idrologia.polito.it/didattica/Idrologia/2016/blocco1/Dispensa_L-Momenti.pdf (ultimo accesso 25/08/2021).

Il Bo Live UniPD, 2021. Eventi meteorologici estremi ed emergenza climatica: un legame non causale | Il Bo Live UniPD. Disponibile online: <https://ilbolive.unipd.it/it/news/eventi-meteorologici-estremi-emergenza-climatica> (ultimo accesso 25/06/2021).

ISPRA, 2021. Eventi estremi — Italiano. Disponibile online: <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/cambiamenti-climatici/eventi-estremi> (ultimo accesso 06/08/2021).

ISPRA, 2021. Gli Annali Idrologici — Italiano. Disponibile online: <https://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/acque-interne-e-marino-costiere-1/progetti-conclusi/progetto-annali/gli-annali-idrologici> (ultimo accesso 06/08/2021).

ISPRA, 2021. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Disponibile online: <https://www.isprambiente.gov.it> (ultimo accesso 06/08/2021).

Istat, 2021. Confini delle unità amministrative a fini statistici al 1° gennaio 2021. Disponibile online: <https://www.istat.it/it/archivio/222527> (ultimo accesso 09/08/2021).

Manuali Hoepli, 2021. Manuali tecnici – Hoepli – manuali. Disponibile online: https://manualihoepi.it/media/doc/usai_cap1.pdf (ultimo accesso 09/09/2021).

Mazzoglio, P., Butera, I. e Claps, P. (2020). I²-RED: A Massive Update and Quality Control of the Italian Annual Extreme Rainfall Dataset. *Water* 2020, 12(12), 3308. <https://doi.org/10.3390/w12123308>

Ministero della Transizione Ecologica, 2021. Geoportale Nazionale. Disponibile online: <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/> (ultimo accesso 10/08/2021).

Morbidelli R., Saltalippi C., Dari J. e Flammini A. (2021). A Review on Rainfall Data Resolution and Its Role in the Hydrological Practice. *Water* 2021, 13, 1012. <https://doi.org/10.3390/w13081012>

Muller A., Bacro J-N. e Lang M. (2007). Bayesian comparison of different rainfall depth–duration–frequency relationships. *Stoch Environ Res Risk Assess* (2008) 22:33–46. DOI:[10.1007/s00477-009-0323-1](https://doi.org/10.1007/s00477-009-0323-1)

OMIRL, 2021. Osservatorio Meteo Idrologico della Regione Liguria – ARPAL. Disponibile online: <https://omirl.regione.liguria.it> (ultimo accesso 17/05/2021).

Papalexiou S.M., Dialynas Y. G. e Grimaldi S. (2016). Hershfield factor revisited: Correcting annual maximum precipitation. *Journal of Hydrology* 542 (2016) 884–895. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.058>

Penta A. (1974). Convegno di idraulica. Distribuzione di probabilità del massimo annuale a_g dell'altezza media di pioggia giornaliera su un bacino. Disponibile online: <http://www.diiia.unina.it/pdf/pub0344.pdf> (ultimo accesso 30/08/2021).

Piano di Gestione del distretto idrografico del fiume Po, 2021. Progetto di Piano di Gestione 2021 – Piano acque. Disponibile online: <https://pianoacque.adbpo.it/progetto-di-piano-di-gestione-2021/> (ultimo accesso 07/07/2021).

Record Meteorologici in Real Time, 2021. Record Pluviometrici Italiani. Disponibile online: http://recordmeteo.altervista.org/record-pluviometrici-italiani/?doing_wp_cron=1627638197.0677371025085449218750 (ultimo accesso 30/07/2021).

Regione Liguria, 2021. Ambiente in Liguria: meteo. Disponibile online: http://www.cartografiarl.regione.liguria.it/SiraQualMeteo/script/PubAccessoDatiMeteo.asp?_ga=1.72242512.237291058.1481558988 (ultimo accesso 30/05/2021).

Regione Liguria, 2021. Torrente Lavagna – Genova – Piani di bacino – Sito ufficiale della Regione Liguria per l'ambiente. Disponibile online: http://www.pianidibacino.ambienteinliguria.it/GE/lavagna/documenti/IdrologiaDCR8_2016.pdf (ultimo accesso 07/09/2021).

Rusconi A., “Idrografia e Idrologia del Po” (2009). Dialoghi Internazionali, n. 10 aprile 2009. Bruno Mondatori, Milano. Disponibile online: https://www.milomb.camcom.it/c/document_library/get_file?uuid=e92f863a-015d-4c38-886c-3862e2d97713&groupId=10157 (ultimo accesso 06/07/2021).

Sarkar S. e Maity R. (2020). Estimation of Probable Maximum Precipitation in the context of climate change. *MethodsX* 7 (2020) 100904. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100904>

SCIA, 2021. SCIA – Isprambiente. Disponibile online: <http://www.scia.isprambiente.it/wwwrootscia/scia.html> (ultimo accesso 20/06/2021).

van Montfort M.A.J. (1996). Concomitants of the Hershfield factor. *Journal of Hydrology* 194 (1997) 357–365. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03212-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03212-X)

VAPI, 2021. Progetto speciale VAPI. Disponibile online: http://www.idrologia.polito.it/gndci/rapportiPdf/Rapporto_VaPi_NO%202001_UO1-8.pdf (ultimo accesso 08/07/2021).

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2021. CIMO Guide | World Meteorological Organization (ultima versione del 2014 e con aggiornamento del 2017). Disponibile online: <https://community.wmo.int/activity-areas/imop/cimo-guide> (ultimo accesso 19/08/2021).

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il Prof. Ing. Claps Pierluigi, relatore della mia tesi, per la professionalità, disponibilità, gentilezza, per avermi seguita ed affiancata nel percorso di lavoro.

I miei ringraziamenti sono rivolti al correlatore Ing. Mazzoglio Paola per la supervisione, i fruttuosi suggerimenti e la cordiale collaborazione dimostratami durante l'elaborazione della tesi.

Un ulteriore ringraziamento ad entrambi per la loro particolare attenzione rivoltami durante questo difficile periodo della pandemia, che mi ha vincolato a svolgere l'intera tesi da remoto.

Un ringraziamento lo dedico alla mia famiglia per avermi sempre incoraggiata e supportata moralmente e finanziariamente; ai miei genitori che con il loro amore mi permettono di superare qualsiasi ostacolo; un abbraccio a mia nonna che, con la sua amorevolezza e saggezza, indirizza le mie scelte di vita; ai miei zii che, con il loro affetto e i loro sguardi di soddisfazione, hanno condiviso le mie decisioni; a mia cugina che mi asseconda in ogni esperienza con allegria e complicità.

Ringrazio i miei amici con i quali ho condiviso questo percorso, le lunghe intense giornate di studio e che hanno saputo regalarmi momenti di gioia, vitalità e divertimento.