



I Facoltà di Architettura

I Facoltà di Ingegneria

Master universitario di II livello in Ingegneria del Suolo e delle Acque

Sede territoriale di Cremona

Tesi di Master universitario

**Sulla Stima delle curve di possibilità
pluviometriche nella Provincia di Cremona:
elaborazione ed analisi di nuove ed esistenti
serie storiche**

Candidato: ing. Davide Horeschi

Relatore: prof. Nicola Montaldo

Correlatore: prof.ssa Priscila Escobar

Tutor della sede di tirocinio: ing. Stefano Loffi

Sede del tirocinio:



Consorzio Irrigazioni Cremonesi

III ciclo

Anno Accademico 2003/2004

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare la mia famiglia ed i proff. Larcan e Paolillo, per avermi dato l'opportunità di frequentare questo corso master. Ringrazio moltissimo il docente Nicola Montaldo, per avermi assistito come relatore molto paziente durante tutta la tesi e per i tanti consigli dati in corso d'opera. Esprimo inoltre la mia gratitudine alla prof.ssa Escobar per le attività di supporto alla tesi e per il suo cortese interessamento. Voglio inoltre ricordare il prof. De Michele per le indicazioni fornite durante i momenti più delicati del lavoro svolto.

Infine non posso dimenticare l'ing. Stefano Loffi, a cui esprimo la mia sincera riconoscenza per gli interessanti argomenti che ho potuto trattare in sede di stage presso il Consorzio. Un riconoscimento particolare va anche alla sua disponibilità all'ascolto ed alla sollecitudine, dinnanzi alle problematiche che ho incontrato soprattutto nei primi momenti e all'occorrenza durante tutta la durata del tirocinio.

INDICE

Introduzione

1: Aspetti idrologici del territorio Cremonese	1
1.1 Caratteristiche meteorologiche	1
1.2 Idrografia superficiale	2
1.3 Cenni sull'evoluzione storica della rete irrigua cremonese e sulla nascita del Consorzio Irrigazioni	4
2: I dati utilizzati	9
2.1 Descrizione dei dati	9
2.2 Le stazioni pluviometriche	10
2.3 La stazione di Genivolta	12
2.3.1 Il funzionamento del pluviografo	12
2.3.2 La lettura dei dati	14
3: Elaborazioni statistiche	18
3.1 La distribuzione del I tipo	19
3.1.1 Metodo dei quantili regolarizzati	21
3.1.2 Metodo vincolato	24
3.2 Cenni sulle distribuzioni del II e III tipo	26
3.3 La distribuzione GEV	27
3.4 Il test di Kolmogorov-Smirnov	31
4: Risultati sperimentali	33
4.1 La serie storica di Genivolta	33
4.2 L'omogeneità dei dati	35
4.3 Gli esiti con la distribuzione EV 1	36
4.3.1 Metodo dei quantili regolarizzati	40
4.3.2 Metodo vincolato	49
4.4 Gli esiti con la GEV	55
4.5 Confronto tra le distribuzioni EV 1, GEV ed il rapporto VAPI	62
4.6 Il caso di Bozzolo	67
Conclusioni	71
Bibliografia	74

INTRODUZIONE

La presente tesi è frutto di uno stage svolto presso il Consorzio per l'Incremento delle Irrigazioni nel Territorio Cremonese, un ente morale sito a Cremona che si occupa della gestione della rete irrigua in provincia, garantendo alle imprese agricole che se ne servono l'apporto idrico necessario alle colture. Il tirocinio in questione ricade nell'ambito delle attività curricolari del master in Ingegneria del Suolo e delle Acque organizzato dal Politecnico di Milano – Polo di Cremona.

Lo scopo specifico di tale stage è l'elaborazione dei dati pluviometrici della provincia di Cremona, dati che si identificano con le massime altezze di pioggia annuali registrate per le durate di 1, 3, 6, 12 e 24 h di dodici stazioni pluviometriche site nel territorio provinciale o comunque nelle immediate vicinanze, poco al di fuori del confine amministrativo. Tali elaborazioni sono finalizzate alla stima delle curve di possibilità pluviometrica, dette anche curve segnalatrici. Si tratta di relazioni matematiche che in Europa vengono abitualmente espresse nella seguente forma monomia:

$$h = ad^n \quad (1)$$

dove l'altezza di pioggia caduta su un punto del territorio è espressa in funzione della durata delle evento meteorico ovviamente a meno di parametri, che vengono stimati a partire dalle serie storiche stesse, seguendo tutta una gamma di procedure di cui si parlerà diffusamente nei capitoli seguenti. Queste curve rivestono un grande interesse in idrologia e più in generale nella wastewater engineering, perché hanno molteplici applicazioni. Tra queste possiamo ricordare:

- Il dimensionamento di reti di drenaggio in ambito urbano e rurale, che richiede una stima attendibile delle piogge da smaltire.
- La progettazione di tutti gli interventi di difesa e di conservazione del suolo e del territorio. Infatti la previsione degli eventi più intensi è un punto cruciale per la valutazione del rischio idrogeologico (Burlando e Rosso).
- In generale il dimensionamento di qualsivoglia opera idraulica quale ad esempio canali a scopi irrigui.

In particolare nell'ambito della presente tesi le curve segnalatrici serviranno a futuri dimensionamenti della rete irrigua gestita dal Consorzio e sparsa lungo tutto il territorio provinciale.

Poiché si parla in termini di stima, ne consegue che i modelli che si utilizzeranno per l'elaborazione di dette curve sono di tipo stocastico, in quanto l'approccio di tipo deterministico è difficilmente utilizzabile almeno per le applicazioni ingegneristiche (Burlando). Infatti risulta ancora insufficiente la conoscenza dei meccanismi fisici che regolano la dinamica e l'evoluzione dei nubifragi. Ad esempio usando l'approccio deterministico non si è ancora in grado di rispondere con precisione a quesiti sul quando, sul dove e sulla durata di una pioggia, ma soprattutto sulla quantità di acqua che potrebbe cadere. A maggior ragione sarebbero ancora più incerte considerazioni sugli eventi di pioggia intensi. Per questi motivi ancora oggi si predilige l'approccio stocastico. In altri termini si considera un evento piovoso in termini di probabilità di accadimento, a partire dallo studio delle serie storiche poc'anzi citate per la stazione in esame. Naturalmente perché le elaborazioni siano affidabili e rispondenti alla situazione meteo-climatica corrente, i dati a disposizione per ogni stazione devono essere per prima cosa misurati in maniera corretta sulla base delle precipitazioni occorse, essere in numero sufficiente e soprattutto aggiornati ad anni recenti.

In tale contesto si inserisce il secondo obiettivo di questa tesi. Il Consorzio Irrigazioni Cremonesi dispone di un pluviografo collocato a Genivolta operativo dal 1977 fino ad oggi. Dal momento che gli annali riportano per tale località ventitre anni (fino al 1979), tramite le rilevazioni dello strumento in dotazione all'Ente si sono voluti aggiornare le rilevazioni sugli eventi piovosi d'interesse fino al 2003, portando il set dati a ben quarantasei anni di osservazioni. Tale lavoro è stato compiuto tramite la paziente lettura manuale di tutte le strisciate prodotte dal pluviografo nel corso degli ultimi ventitre anni.

In secondo luogo tutte le curve sono state confrontate col rapporto VAPI, sigla che sta per *Valutazione delle Piene in Italia*. Si tratta di un progetto curato dal Politecnico di Milano assieme al CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) che ha studiato le portate al colmo di piena nel bacino del fiume Po e della Liguria Tirrenica (anno di pubblicazione 2001). All'interno di questo rapporto sono stati calcolati anche i parametri caratteristici delle curve segnalatrici di diverse località e tra queste anche quelle in esame nella presente tesi. Dal loro raffronto, specie nel caso di Genivolta, si desidera appurare se vi siano dei cambiamenti significativi dei parametri.

Aspetti idrologici del territorio Cremonese

1.1 CARATTERISTICHE METEOCLIMATICHE

Il territorio cremonese, incastonato grosso modo tra i fiumi Adda a nord-ovest, Po a sud-ovest ed Oglio su tutta la fascia est è situato nel cuore della Pianura Padana. Il territorio in questione ricade dal punto di vista climatico nella zona sub continentale con inverni freddi ed estati afose, sebbene i livelli di continentalità non siano affatto paragonabili ad aree più interne come ad esempio la Siberia. Le isoterme medie annue della Lombardia garantiscono alla provincia di Cremona una temperatura media annua al di sopra dei 12°C. Statisticamente Gennaio è il mese più rigido con temperature attorno agli 1-2°C, mentre quello più caldo è Luglio con valori medi mensili tra i 22-24°C.

L'area europea è particolarmente interessata dalle perturbazioni atlantiche che seguono un moto sub orizzontale da ovest ad est, ma in tale contesto le Alpi, che cingono la pianura padana a nord, costituiscono una formidabile barriera di protezione nei confronti di queste perturbazioni. Tutto ciò porta ad un'elevata stabilità delle masse d'aria gravanti sul territorio cremonese in special modo in estate ed inverno, periodo in cui non a caso si formano in concomitanza di inversioni termiche le nebbie e le gelate (Andreoli et al.).

Durante l'estate una fitta rete idrografica superficiale di origine naturale ed artificiale, associata ad un basso regime anemologico, favorisce un alto tasso di umidità a bassa quota. In un simile contesto l'instabilità è legata essenzialmente a nuclei di aria fredda provenienti dalle vallate alpine. Detta instabilità si traduce in episodi temporaleschi di forte intensità e talvolta accompagnati da grandine, ma di breve durata e localizzati in maniera puntuale sul territorio. A prescindere da ciò i principali fenomeni meteorologici responsabili del maltempo sull'area in esame sono le cosiddette saccature, ossia campi di bassa pressione con isobare disposte a "V" che sono prolungamenti di zone depressionarie più estese. A queste si aggiungono minimi isolati e depressioni sottovento alle Alpi. Infatti il maggior contributo alle precipitazioni in provincia è proprio dato da un flusso perturbato meridionale di norma in transito da ovest verso est e spesso

associato a depressioni secondarie sul golfo di Genova, che sono infatti sottovento alle Alpi. Se presenti, tali depressioni esercitano un effetto volano della perturbazione, che permane in transito sulla pianura padana nel suo corso da fino al proprio esaurimento nel mare Adriatico. Infine le precipitazioni sul cremonese sono da ascrivere anche a depressioni presenti sul Mediterraneo, come ad esempio quelle africane. Tutti i fenomeni sovresposti sono frequenti in autunno ed in primavera.

Sulla base di quanto detto le precipitazioni in provincia hanno nel corso dell'anno la caratteristica distribuzione comune in pianura padana con il massimo assoluto in autunno, un massimo relativo in primavera, un minimo assoluto in inverno ed un minimo secondario in estate. Conseguentemente il mese più piovoso è novembre, quello più secco gennaio. Si ricordi infine che, come già accennato, è presente una modesta piovosità estiva, ma, in quanto legata a fenomeni temporaleschi, dà apporti idrici mal distribuiti, soprattutto se ci si pone in un'ottica irrigua. In termini di precipitazioni cumulate annue il territorio in analisi è collocato a cavallo tra le isoiete di 950 e 800 mm, con un gradiente decrescente lungo l'asse principale della provincia da NW a SE.

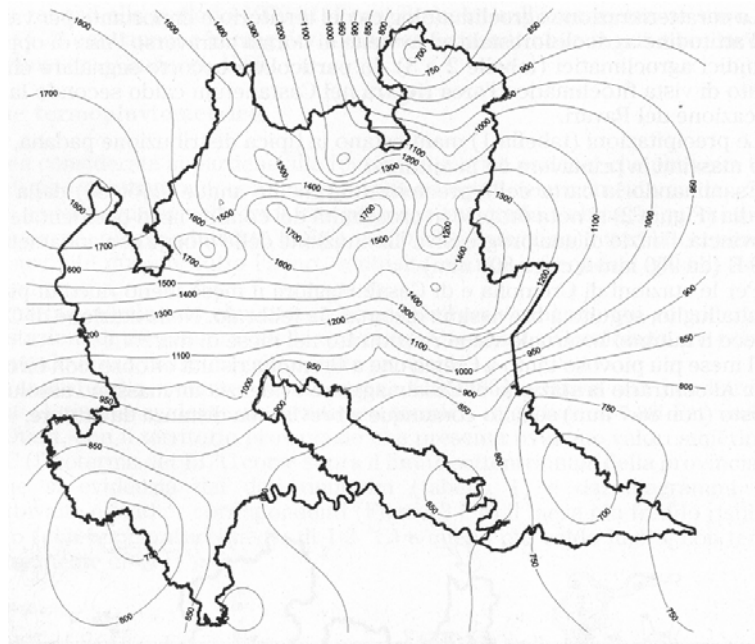


Fig. 1: precipitazioni medie annue in mm (dalla monografia Pianura)

1.2 IDROGRAFIA SUPERFICIALE

Come già accennato nel precedente paragrafo, tre corsi naturali che lambiscono la provincia ai suoi lati e rilevanti per essa sono l'Adda, l'Oglio ed il Po; a questi però va

anche aggiunto il fiume Serio, affluente dell'Adda, che attraversa il cremasco in senso longitudinale da nord a sud.

Accanto a questi fiumi vanno anche citati elementi secondari dell'idrografia superficiale non per questo meno importanti ai fini del trasporto idrico. Si tratta di navigli, canali di bonifica ed irrigazione, rogge e colatori (fig. 2), che nel loro insieme formano un fitto reticolo idrografico, che assolve una duplice funzione. Da un lato garantisce la distribuzione dell'acqua a scopo irriguo in tutta la provincia e dall'altro assicura l'allontanamento delle acque piovane in eccesso. Questa rete efficientissima e forse, come più volte notato, unica al mondo si avvale inoltre di due opere d'invaso presso i laghi d'Iseo e di Como, riserve idriche indispensabili nel periodo estivo, che nel clima padano è piuttosto povero di precipitazioni.

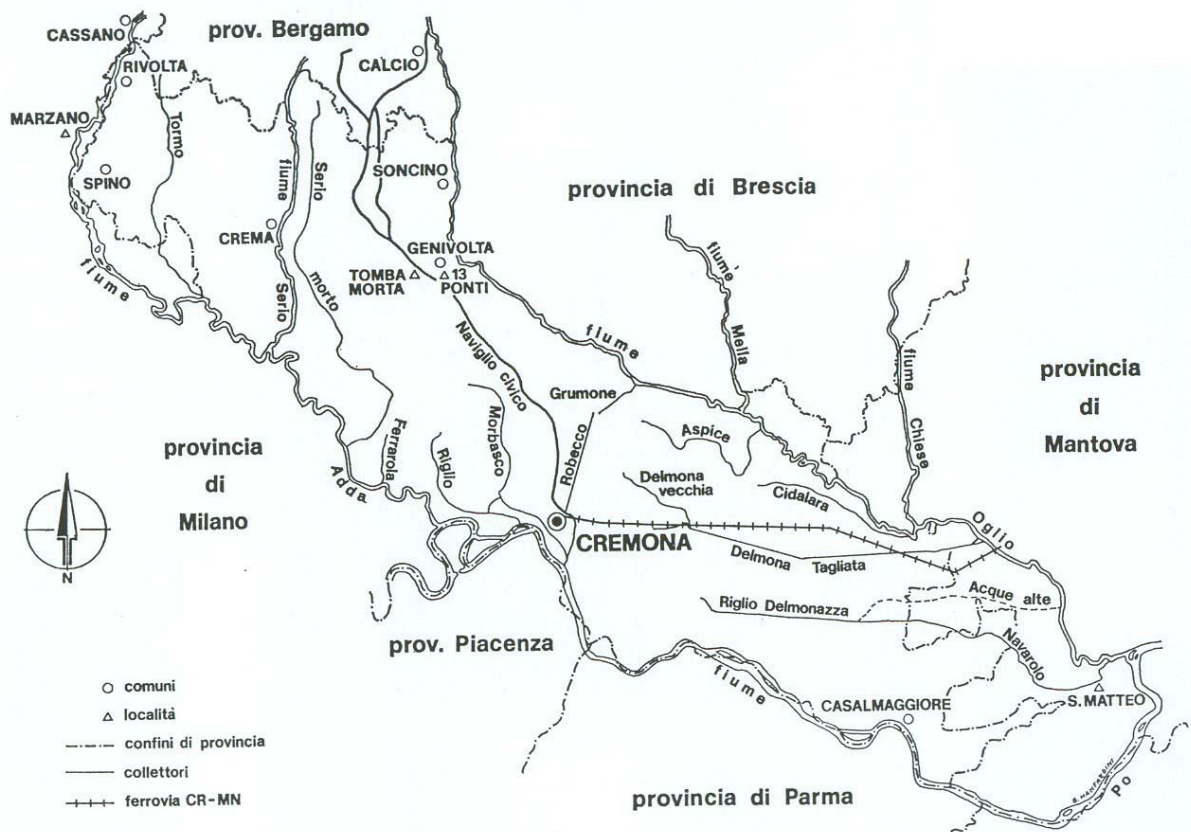


Fig. 2: idrografia superficiale nel territorio cremonese

Infine a completare il quadro si segnalano le risorgive a nord della provincia, nella zona a cavallo tra il Cremasco ed il Bergamasco, in cui si ha a livello geologico il passaggio tra alta e bassa pianura. L'alta pianura infatti è costituita da ghiaie, caratterizzate da elevata permeabilità, dunque la granulometria grossolana permette facilmente l'infiltrazione ed il transito sotterraneo delle acque. Senonché, discendendo verso sud, la diminuzione della granulometria causa il progressivo innalzamento delle falde acquifere, che arrivano ad

emergere sul piano di campagna nelle zone più depresse. Le acque emergenti creano così delle sorgenti chiamate per l'appunto risorgive. Il fontanile invece è l'opera artificiale di collettamento delle risorgive, che in passato fu utilizzato per prosciugare zone paludose. Al di là della dismissione e dell'abbandono dei fontanili oggi in controtendenza, le risorgive sono una voce importante nell'apporto idrico, in quanto soddisfano il 50% del fabbisogno irriguo nel Cremasco.

Al termine di questa disamina possiamo osservare come le regimazioni dell'Adda, dell'Oglio e delle risorgive siano fortemente influenzate dall'intervento antropico. Tali interventi si sono però resi necessari, per creare una dispensa irrigua da utilizzarsi durante la stagione secca, stagione che non ha più causato grossi problemi in agricoltura, da quando le grandi opere idrauliche oggi esistenti sono entrate in esercizio.

1.3 CENNI SULL'EVOLUZIONE STORICA DELLA RETE IRRIGUA CREMONESE E DELLA NASCITA DEL CONSORZIO

Una volta illustrata l'idrografia superficiale della provincia è d'obbligo accennare sulla sua evoluzione storica e su come in tale contesto si sia inserita la nascita del Consorzio.

La rete di adduttori e dispensatori attinge acqua dalle risorgive e dai fiumi che lambiscono la provincia o la attraversano, come già discusso nel par. 1.2. Tale rete è stata creata nel corso dei secoli su iniziativa di comunità religiose e civiche o da famiglie nobili, per dotare i vasti possedimenti di acqua. In questo modo venivano assolte diverse esigenze tra cui quelle igieniche, militari, energetiche (azionamento dei mulini), di navigazione (includendo non solo il trasporto di persone, ma anche di merci sull'acqua) e naturalmente di irrigazione. L'utilizzo di colatori, che si avvalevano di corsi d'acqua naturali già esistenti fu affiancato da un moltiplicarsi di dispensatori, che, attingendo tutti da una medesima zona, portavano acqua a appezzamenti vicini fra loro con percorsi paralleli e contigui. In tal modo ogni comunità o famiglia patrizia poteva disporre di propri canali per i suoi possedimenti, senza che altri rivendicassero diritti.

Storicamente furono due le principali reti irrigue nel cremonese. Una di queste è nota col nome di Naviglio Civico. Intorno all'XI secolo questa rete già attingeva da fontanili e colature della bassa bergamasca e del soncinese; in seguito Cremona aspirò a derivare le acque dell'Oglio in virtù di un privilegio concesso dall'imperatore Ottone I e più volte riconfermato dai suoi successori fino a Ludovico IV il Bavaro. Fu così che la città riuscì a cingere le sue mura con una fossa, distante settanta chilometri dall'opera di presa

sull'Oglio. Tutto ciò garantì come effetto indotto l'irrigazione delle campagne sovrastanti la città e la forza motrice per diversi opifici.

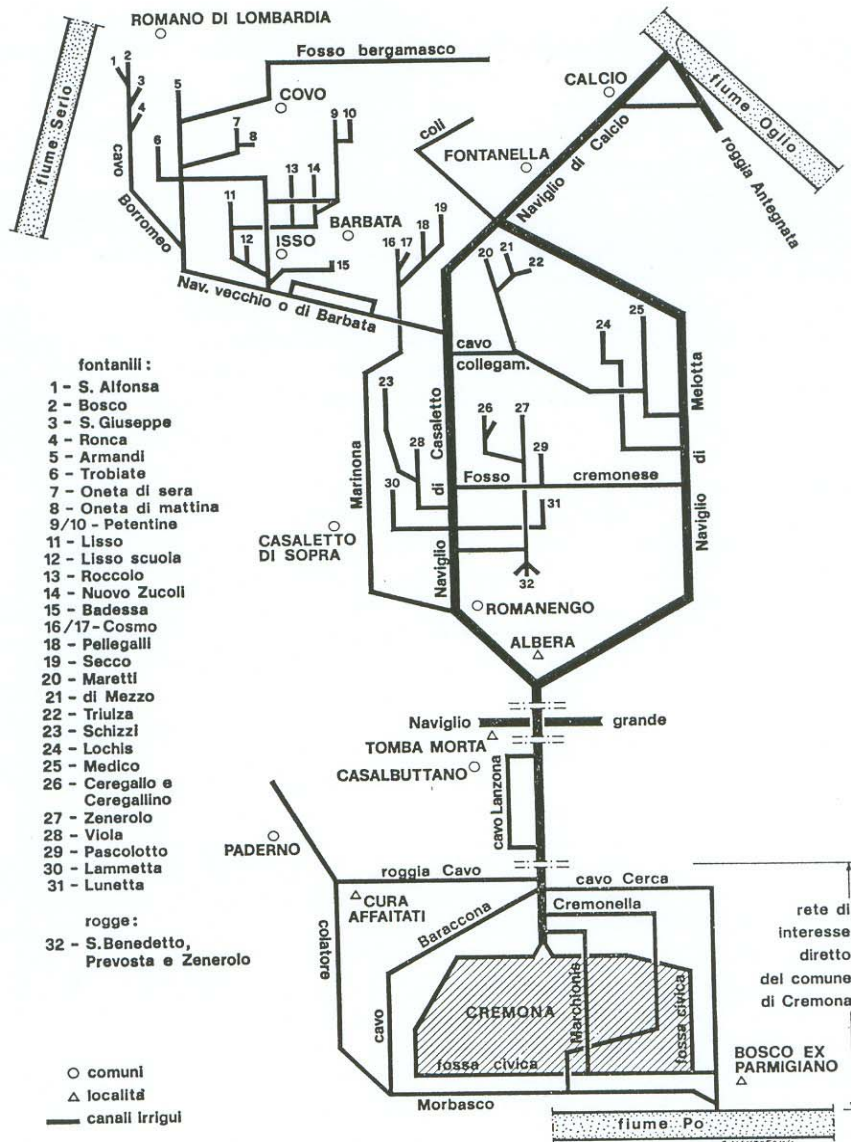


Fig.3: rete del Naviglio Civico

La seconda rete irrigua è chiamata Condominio Pallavicino (fig.4), che dal 1893 in avanti è divenuta proprietà del Consorzio Irrigazioni. Questa rete di canali a differenza della prima è sorta grazie ad un'iniziativa privata ad opera del marchese Galeazzo Primo Pallavicino e successivamente da suo figlio Adalberto nel XVI secolo. La rete è costituita da tanti canali principali e secondari che attingono dal fiume Oglio e a tutto questo si aggiunge anche l'apporto di fontanili a confine col bergamasco.

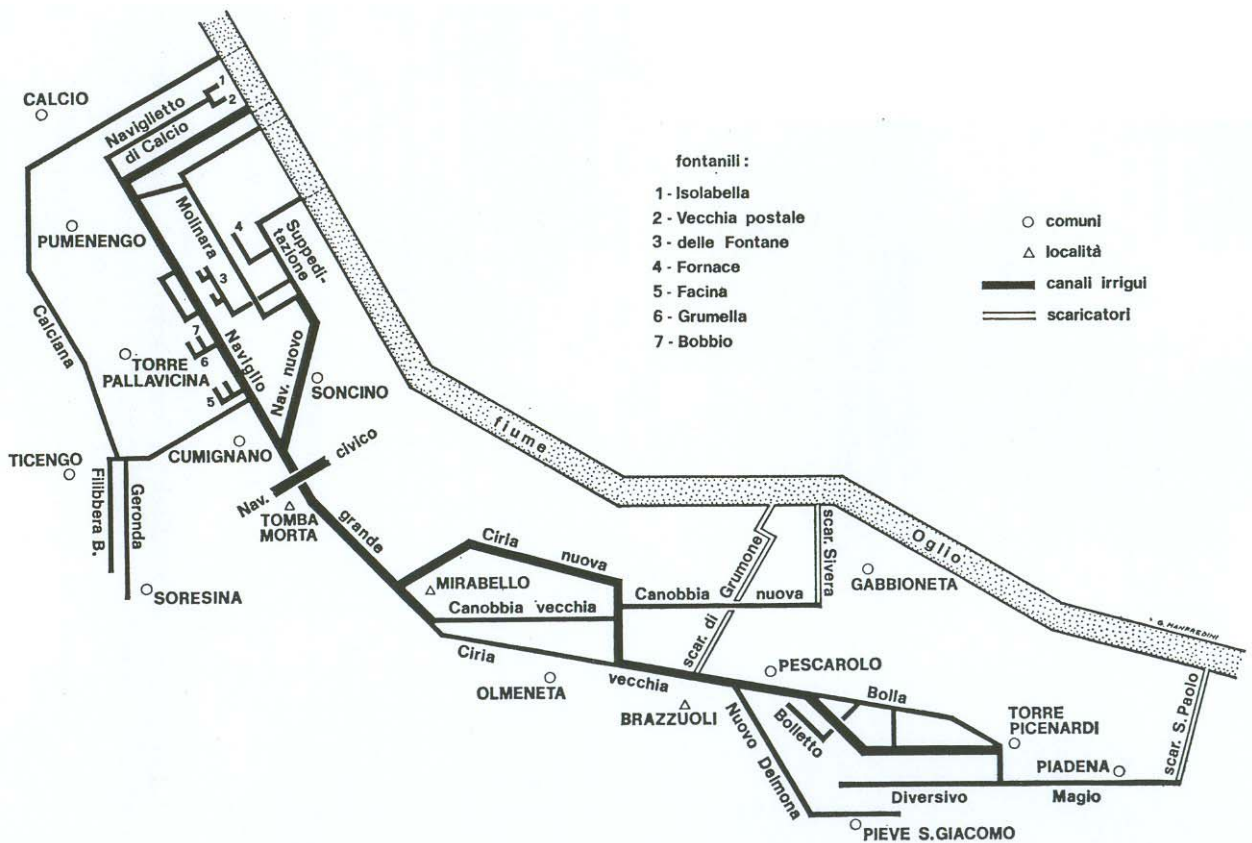


Fig. 4: rete del Condominio Pallavicino

Malgrado l'efficienza delle reti irrigue, nel XIX secolo divenne sempre più evidente una carenza d'acqua in provincia di Cremona ad esclusione del cremasco, specie in estate quando più sostenute erano le esigenze dell'irrigazione. In buona sostanza le acque dell'Oglio non erano più sufficienti a soddisfare la richiesta d'acqua e del resto l'opera d'invaso presso il lago d'Iseo sarebbe iniziata solamente nel 1933. Infatti la dotazione specifica media era di 0,8 L s-1 ha-1, inferiore dunque al valore di 1 L s-1 ha-1, comunemente consigliato in letteratura per la tutela delle colture. Al tempo di allora l'unica soluzione al problema era la derivazione dall'Adda, distante 34 km dal punto più prossimo alla rete. Benché tale progetto fosse essenziale per l'economia agricola del cremonese, in un primo momento gli operatori del settore non vollero realizzare l'opera. In tale situazione si rivelò fondamentale il lavoro di convincimento e mediazione del senatore Pietro Vacchelli, che convinse cinquantanove comuni del cremonese a finanziare il progetto secondo il principio dell'indebitamento pubblico. Ovviamente l'idea si sarebbe poi dimostrata vincente per l'agricoltura dell'intero territorio.

Il progetto portò alla costruzione di un canale che derivasse e che deriva tutt'oggi l'acqua dall'Adda presso la località Marzano, nel comune di Merlino in provincia di Lodi. Detto canale trasporta le acque lungo il cremasco fino al nodo di Genivolta (località Tombe Morte), dove convergono gli antichi canali derivatori dell'Oglio e da cui si diparte

la rete irrigua nel cremonese. A seguito dell'istituzione del Consorzio Irrigazioni Cremonesi da parte dei cinquantanove comuni il 26 marzo 1883, la costruzione del canale poté partire nel 1887. L'entrata in esercizio di quest'opera avvenne nel 1890 portando la dotazione specifica ad $1,28 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, valore che viene mantenuto ancora oggi, nonostante col tempo si siano aggiunti altri utenti. Ovviamente la domanda idrica è sempre stata soddisfatta, perché nel corso degli anni a partire dall'entrata in funzione del canale denominato poi Vacchelli (ex-Marzano) sono stati effettuati potenziamenti della rete irrigua, nonché aumenti delle derivazioni. A tal proposito si ricordino le regolazioni dei laghi di Como ed d'Isèo degli anni '20 e '30 che permisero un incremento di portata derivabile dall'Adda e dall'Oglio di $1,5 \text{ mc/s}$ per ambo i fiumi e di ulteriori 12 mc/s dall'Adda nel 1948, giungendo così ad un disponibilità idrica attuale di 58 mc/s .

Per quanto concerne i potenziamenti della rete irrigua va ricordato innanzitutto l'acquisto da parte del Consorzio del Condominio Pallavicino nel 1893, Consorzio che divenne così il principale ente irriguo della provincia. In secondo luogo va citata la messa in posa di canali secondari che ha garantito l'approvvigionamento idrico in via autonoma per ogni utente. Allo stato attuale la rete distributiva si estende per 261 km.

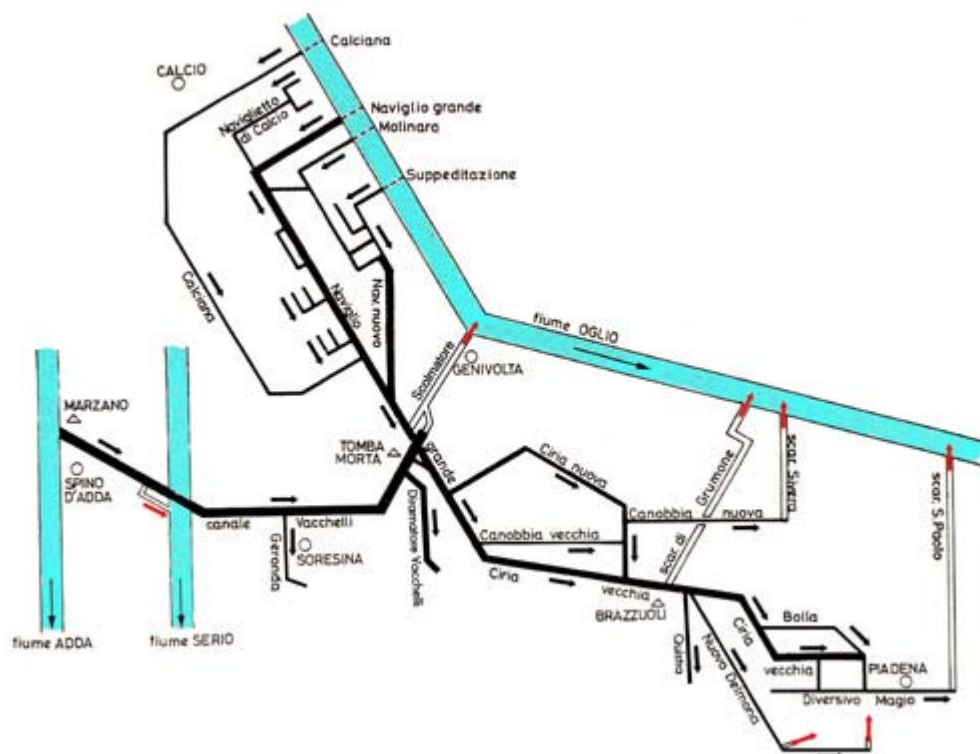


Fig. 5: attuale rete irrigua cremonese

Infine si ricordi che dal punto di vista legale il Consorzio è oggi ufficialmente un ente morale di natura privata senza fini di lucro.



Fig. 6: stemma del Consorzio per l'Incremento della Irrigazione nel Territorio Cremonese.

DESCRIZIONE DEI DATI

2.1 LE CARATTERISTICHE DEI DATI

I dati utilizzati sono esclusivamente di natura pluviometrica; si tratta di volumi specifici di acqua, ossia volumi riferiti all'unità di superficie precipitati in un lasso di tempo prefissato. Adottando dunque il Sistema di Misura Internazionale, si ha un rapporto di metri cubi su metri quadri, che porta, a seguito della semplificazione dimensionale, alla misura lineare corrispondente di fatto ad altezze di pioggia. Perciò dal punto di vista concettuale parlare di una quantità di pioggia caduta in un periodo di tempo Δt significa considerare la lama d'acqua caduta in uno specifico punto di osservazione sul territorio preso in esame e tale punto coincide nella pratica con una stazione pluviometrica. Tuttavia, dal momento che il metro risulterebbe un'unità di misura eccessivamente grande, per quantificare l'altezza di pioggia precipitata, si preferisce adottare un suo sottomultiplo ovvero il millimetro.

Poiché le altezze di pioggia misurate (indicate con H) crescono ovviamente all'aumentare della durata del campionamento, in idrologia si è deciso di assumere una serie di periodi standard a cui riferire tali quantitativi di acqua. Convenzionalmente per una data stazione si hanno in genere le altezze di pioggia riferite ad 1, 3, 6, 12 e 24 ore.

A questo punto per una data stazione pluviometrica funzionante in continuo si potrebbe disporre in linea di principio di una quantità pressoché infinita di dati con le caratteristiche poc'anzi descritte. È chiaro quindi che i dati da utilizzare per le elaborazioni vadano selezionati sulla base di ben determinate logiche. In questo contesto, dal momento che si è interessati ad indagare le precipitazioni più intense, sono state raccolte per ciascuna durata di riferimento le massime altezze di pioggia registrate in ogni singolo anno. Si disporrà così per ciascuna stazione di una tabella o matematicamente parlando di una matrice, composta da m righe e da n colonne (vedi tab. 1), dove :

- **m** rappresenta il numero degli anni in cui sono state effettuate le misurazioni delle precipitazioni ed **n** il numero delle durate di riferimento di dette misurazioni che è pari a cinque, corrispondenti cioè a 1, 3, 6, 12 e 24 ore.

anno	durate				
	1h	3h	6h	12h	24h
1961	35,4	36,6	36,6	37	46,4
1962	23,6	30,8	31,4	51,2	55,2
1963	35,8	37,8	37,8	46	55
1964	25,2	41,6	46,6	61,8	81,4
1965	23,2	48,6	61,2	65	69,6
1966	28,6	30,2	46	52	78,6
...
...
1991	12,6	28,4	39,4	56	65,8

n colonne

n righe

Tab. 1: esempio di matrice dati

In definitiva per ogni stazione si avranno quindi un totale di **mxn** dati (tralasciando eventuali lacune nelle misurazioni) e tale matrice costituisce il punto di partenza da cui effettuare tutte le successive elaborazioni numeriche.

2.2 LE STAZIONI PLUVIOMETRICHE

I dati utilizzati si riferiscono alle stazioni di rilevamento site nel territorio cremonese e zone limitrofe (tab. 2). I dati sono stati attinti dal data base dell'Ufficio Idrografico dell'ARPA-Lombardia;

stazione	prov.	da	a
Bozzolo	MN	1951	1986
Casalmaggiore	CR	1961	1991
Codogno	LO	1934	1985
Crema	CR	1930	1970
Cremona	CR	1930	1991
Fontanella	BS	1955	1991
Genivolta	CR	1955	2003
Lodi	LO	1960	1991
Orzinuovi	BS	1936	1972
Pieve S.Giacomo	CR	1949	1991
S. Matteo Chiaviche	MN	1965	1991
Treviglio	BG	1934	1986

Tab. 2: stazioni utilizzate nell'elaborazione dei dati

tuttavia un discorso a parte va riservato alla stazione di Genivolta, di cui si parlerà diffusamente nel par 2.3. Osservando la fig. 7 si può avere un'idea della collocazione delle stazioni rispetto nel territorio.

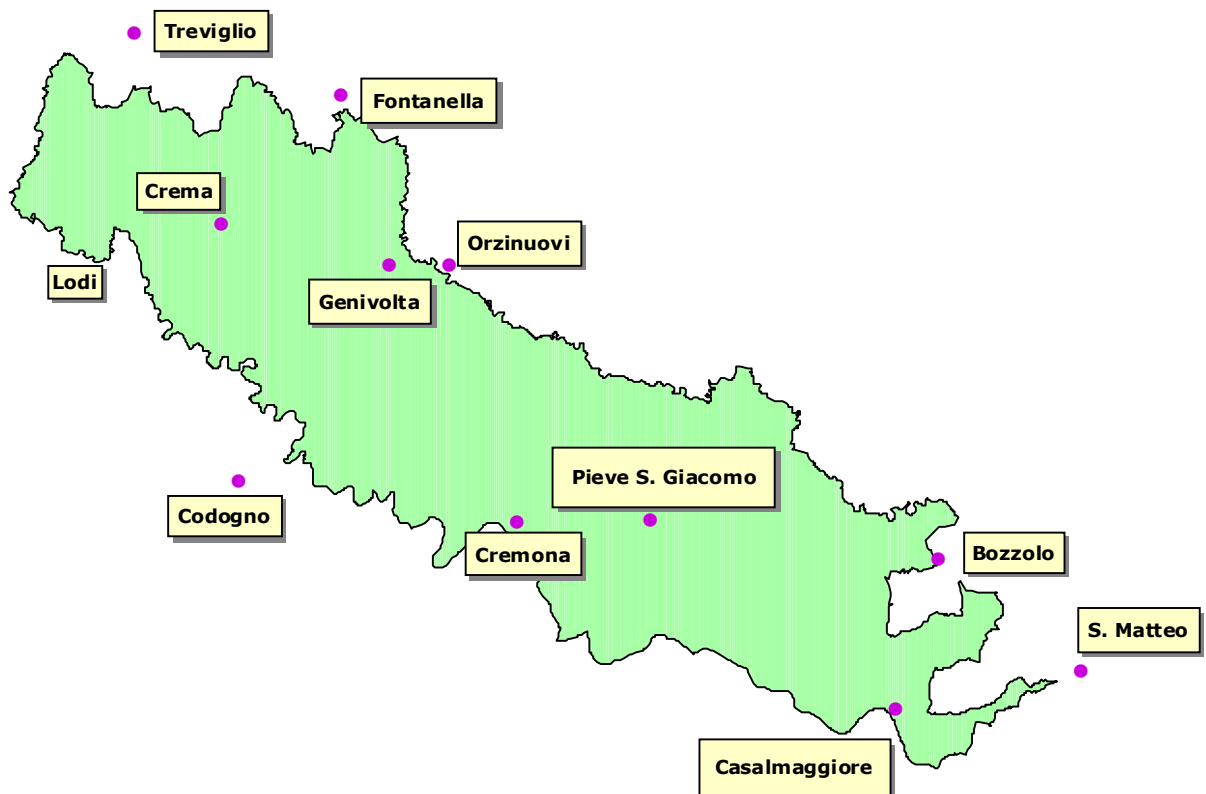


Fig. 7: l'area in verde rappresenta la provincia di Cremona, i punti indicano le stazioni pluviometriche

È giusto ricordare però che tra le dodici scelte solo quelle di Cremona, Crema, Genivolta, Pieve S. Giacomo e Casalmaggiore ricadono a stretto rigore nel territorio della provincia di Cremona. Ciononostante sono state considerate anche le località di Bozzolo, S. Matteo delle Chiaviche, Codogno, Fontanella, Lodi, Orzinuovi e Treviglio, in quanto cadono appena fuori del confine amministrativo e quindi dal punto di vista meteorologico le serie di dati ad esse associate sono perfettamente paragonabili.

Come si evince dalla tab. 2 le serie storiche ricoprono un diverso numero di anni a seconda della località e vanno da un minimo di ventitre anni fino ad un massimo di cinquantotto. Come già ricordato nell'introduzione, le serie storiche, un tempo curate dal SIMN (servizio Idrografico Mareografico Nazionale), sono oggi gestite dall'agenzia regionale per l'ambiente (ARPA) che ha ricevuto in consegna i dati stessi. Per cui essi derivano dagli annali idrologici.

2.3 LA STAZIONE DI GENIVOLTA

Le serie temporali di tale stazione vanno dal 1955 al 2003 e sono inoltre quelle più aggiornate. Tuttavia diversamente dagli altri casi la popolazione campionaria in esame ha due origini diverse. I dati dal 1955 al 1979 provengono dagli annali idrologici, mentre le altezze di pioggia riferite ai restanti ventitre anni sono state estrapolate nel corso del presente lavoro dalle strisciate del pluviografo in dotazione al Consorzio.

2.3.1 Il funzionamento del pluviografo

Il pluviografo è lo strumento che misura in continuo (ventiquattrore su ventiquattro, sette giorni su sette) l'andamento delle piogge nel punto dove è stato collocato ed è grazie a questo dispositivo che si ottengono le serie storiche. In commercio ne esistono diversi tipi; nel nostro caso il modello in dotazione è di tipo a bascula.

Il dispositivo è custodito all'interno di una capannina (fig. 8) sita in campo aperto presso una camperia di Genivolta.



Fig.8: pluviografo a bascula in dotazione al Consorzio

Lo strumento è costituito da un cilindro rotante ad un'opportuna velocità su cui vi è avvolto un nastro cartaceo. A contatto col nastro è presente un pennino inchiostroato che si può muovere solo trasversalmente al senso di rotazione del tamburo. Il pennino a sua volta è connesso ad un recipiente basculante a due scomparti, da cui è tratto il nome del modello. Infine tale recipiente è collegato tramite un tubo di plastica ad un imbuto esterno posto sulla sommità della capannina (fig 9).



fig.9: capannina di rilevamento

In periodo di pioggia l'acqua caduta nell'imbuto viene convogliata tramite il tubo di plastica ad uno dei due recipienti. Quest'ultimo si inclina progressivamente a causa del peso dell'acqua via via in arrivo e tutto ciò fa spostare verso una direzione il pennino inchiostroato, che, in quanto tale, lascia traccia sul nastro. Quando un recipiente giunge al colmo della sua capienza, libera di colpo l'acqua in esso contenuta, che verrà allontanata

tramite un apposito condotto. Successivamente la pioggia in arrivo viene convogliata nell'altro recipiente, che con analogo meccanismo fa muovere il pennino a causa del crescente peso del liquido raccolto; tuttavia in questo caso il movimento del pennino avviene nel senso opposto al precedente. Nel momento in cui il secondo recipiente giunge a piena capienza, si svuota e dunque l'acqua viene raccolta nuovamente nel recipiente iniziale. Si procederà così in maniera alternata per tutta la durata dell'evento piovoso. Si ricordi infine che specie durante gli eventi più intensi il ribaltamento del recipiente basculante può normalmente causare una perdita di acqua pari al 5% (Moisello).

2.3.2 La lettura dei dati

In forza del funzionamento sovrapposto il pluviografo produce sul nastro cartaceo il grafico in fig. 10.



Fig. 10: grafico prodotto dal pluviografo

Ogni strisciata, che riporta l'andamento delle piogge per una settimana dell'anno, è quadrettata per agevolare l'interpretazione del grafico. In orizzontale ciascun trattino o modulo rappresenta una precisa ora di un determinato giorno della settimana in esame, come si può notare dal bordo superiore del nastro. Invece il modulo in verticale indica 2 decimi di millimetro di pioggia caduta; conseguentemente cinque tacche, che rappresentano un millimetro d'acqua, sono racchiuse da due linee orizzontali più marcate, sempre allo scopo di facilitare la lettura. Sulla base di quanto detto è dunque possibile intendere questi grafici, come un'unica funzione continua, disposta su un piano cartesiano con il tempo sull'asse delle ascisse e l'altezza di pioggia sulle ordinate. In pratica si ha a tutti gli effetti una funzione monovariabile di natura prettamente empirica

(e cioè non analitica) del tipo $H = H(t)$, che rappresenta l'andamento delle piogge cadute nel tempo sul punto territoriale in esame.

In forza del funzionamento del pluviografo esposto nel par. 2.3.1 i tratti verticali od inclinati indicano i quantitativi di acqua meteorica caduta in un evento piovoso. Giocoforza i tratti orizzontali evidenziano i momenti in cui il pennino era in quiete, ovvero quando si è registrata assenza di pioggia.

A questo punto attraverso la lettura visiva di questa funzione si ricercano per ciascun anno solare i massimi di pioggia annuali per le durate canoniche già citate. Idealmente ciò significa:

1. Fissare un orizzonte temporale discretizzato di screening ΔT di 365 giorni coincidente con l'anno solare (dal 1 gennaio al 1 gennaio).
2. Far scorrere lungo il grafico una finestrella di ampiezza temporale $\Delta \tau$, prefissata di volta in volta, corrispondente a 1,3,6,12 e 24 ore lungo l'asse delle ascisse ed entro i limiti del periodo annuale ΔT .
3. Individuare ed annotare il quantitativo massimo di millimetri d'acqua caduti nel lasso di tempo $\Delta \tau$.
4. Ripetere la procedura a partire dal punto 2, cambiando l'ampiezza temporale della finestrella.
5. Una volta individuati tutti i massimi di pioggia di durata $\Delta \tau$ riferiti al periodo annuale ΔT , considerare l'anno solare successivo e ripetere la procedura dal punto 1, fino allo screening completo di tutti gli anni a disposizione.

Operando nel modo sopraesposto è stato così possibile compilare la matrice dati per la stazione di Genivolta di cui al par. 2.1.

Ovviamente perché la compilazione dei dati sia effettuabile è necessario in primis che la traccia lasciata dalla punta scrivente sia nitida e non sbavata con macchie, altrimenti non avrebbe alcuna affidabilità la lettura dei grafici. Sotto questo punto di vista tutti i supporti cartacei sono apparsi in buone condizioni e i grafici hanno tratti puliti e ben distinguibili. Fanno eccezione sui ventitre anni di rilevazioni le strisciate di due settimane a causa di alcune sbavature d'inchiostro, che comunque non hanno compromesso la rilevazione dei massimi, in quanto tali periodi non riportano eventi intensi di pioggia.

Oggigiorno le letture dei grafici vengono eseguite da appositi macchinari in automatico od in semi automatico, qualora i grafici siano su formati cartacei (Burlando e Rosso). Se invece la misurazione delle piogge avviene per via elettronica tramite il telerilevamento, sarà il calcolatore stesso a fare in automatico l'opera di screening e d'individuazione dei

massimi. In questo caso tuttavia, non disponendo di alcuna di tali tecnologie, la lettura dei grafici è avvenuta mediante un paziente lavoro manuale.

A questo punto un'osservazione importante è d'obbligo. Per i massimi di pioggia a 24 h potrebbe risultare più semplice adottare il dato proveniente dalle osservazioni idrometriche anziché rilevarlo dai grafici. Per osservazioni idrometriche si intendono le misurazioni dell'acqua caduta in 24 h in coincidenza con un ora fissa prestabilita della giornata, ad esempio alle h. 0.00 di ogni dì. In quest'ipotesi la ricerca del presunto massimo sarebbe più rapida, in quanto basterebbe leggere dai tabulati il dato ricercato. In realtà questa operazione è da evitare, in quanto come detto poc'anzi il processo $H = H(t)$ è continuo e pertanto non va confuso con una sequenza discretizzata dell'evento piovoso, posta su una griglia prefissata di istanti (Rosso e Burlando). Una simile scelta porta come esito una sottomisurazione dei quantitativi d'acqua. Infatti se per esempio si scoprisse (stando alle osservazioni idrometriche) che il massimo di pioggia annuale sulle 24 h sia avvenuto nella giornata 9 Ottobre di un dato anno, consultando il pluviografo si potrebbe scoprire che traslando il $\Delta\tau = 24$ h di due ore in avanti o indietro, si riuscirebbe ad inglobare nella stessa finestrella temporale un quantitativo superiore di pioggia.

Ottenuti i massimi di pioggia per gli anni 1980-2003, questi ultimi sono stati uniti alle serie dei vecchi annali, che vanno dal 1955 al 1979. In questo modo si è così pervenuti ad un set aggiornatissimo di ben quarantasei anni (tab. 3). È doveroso ricordare che in teoria gli anni dovrebbero essere quarantasette, ma un guasto al pluviografo occorso nel 1997 ha messo lo strumento fuori uso per la quasi totalità dell'anno, rendendo perciò assolutamente insufficienti le rilevazioni per il periodo in questione.

A questo punto potrebbe sorgere un dubbio legittimo, ossia se le due serie storiche, pur sempre afferenti alla stessa località, possano costituire un'unica popolazione campionaria. La risposta a tale dubbio verrà fornita nel capitolo 4 "Risultati sperimentali" in un paragrafo ad hoc.

anno	1h	3h	6h	12h	24h	anno	1h	3h	6h	12h	24h
1955	63,0	88,6	98,0	103,6	105,4	1980	20,0	30,0	52,6	61,2	93,2
1956	48,2	48,2	48,4	48,8	48,8	1981	23,6	23,4	32,0	35,0	55,0
1957	52,4	54,6	54,6	55,0	70,0	1982	43,6	56,2	56,4	61,2	61,2
1958	18,0	21,2	36,0	52,2	65,2	1983	19,4	19,4	23,6	28,6	52,0
1959	30,2	65,0	78,0	80,2	86,4	1984	19,8	33,8	35,6	36,0	42,2
1960	37,0	44,2	49,6	63,2	64,6	1985	18,2	26,0	48,8	52,0	51,6
1962	19,4	27,8	32,0	37,4	39,6	1986	13,4	17,4	19,0	33,0	41,4
1963	23,0	31,2	38,6	42,4	58,2	1987	34,6	42,2	46,8	46,8	47,0
1964	22,4	31,2	33,6	54,8	64,4	1988	33,0	38,8	39,0	44,4	53,6
1965	18,0	25,8	25,8	34,4	51,4	1989	28,4	28,4	28,6	31,6	38,0
1966	40,0	43,2	48,2	50,0	64,0	1990	27,6	33,2	44,8	55,8	61,4
1967	42,6	53,8	53,8	53,8	53,8	1991	20,4	20,6	35,6	46,4	54,4
1968	21,0	46,4	52,6	61,6	61,8	1992	54,8	61,0	66,6	84,8	110,0
1969	54,0	66,2	69,6	69,6	69,6	1993	36,6	46,0	65,0	98,4	102,6
1970	22,0	23,6	34,0	52,0	71,8	1994	24,8	42,4	42,6	62,4	75,8
1971	24,8	35,6	35,6	35,6	36,2	1995	38,4	49,2	60,0	90,2	90,2
1972	21,0	26,0	26,0	31,4	38,6	1996	19,6	19,8	20,0	22,2	51,0
1973	20,0	21,2	21,4	34,2	38,8	1998	37,6	57,0	65,8	65,8	74,2
1974	23,4	23,4	23,4	23,4	25,4	1999	34,0	34,2	34,2	34,6	34,6
1975	36,0	44,0	44,2	45,6	54,8	2000	31,6	34,6	38,0	40,4	85,0
1976	17,0	29,8	43,6	45,2	60,2	2001	22,0	29,6	37,2	47,2	48,4
1978	21,4	22,2	35,0	38,6	44,4	2002	24,0	30,2	58,0	82,6	93,6
1979	20,0	40,4	62,4	102,4	124,0	2003	31,0	35,0	35,0	47,2	51,0

Tab. 3: serie storica di Genivolta

ELABORAZIONI STATISTICHE

Le matrici dati dei massimi di pioggia annuali di cui al par 2.1 costituiscono di fatto un insieme di misure indipendenti della grandezza idrologica "altezza d'acqua precipitata". Dai vari set di dati, riferiti alle stazioni d'interesse, sarebbe difficile estrapolare una previsione sulle realizzazioni future a meno di non considerare tali misurazioni come una popolazione campionaria, ovvero come estrazioni indipendenti di una variabile casuale, che in questo caso è l'altezza di pioggia. Ne consegue che la grandezza idrologica in esame è interpretata a mezzo di uno o più modelli probabilistici.

Poiché in questa sede ci si occupa dei massimi valori di pioggia, acquisisce interesse la legge di probabilità, secondo cui potrebbero essere distribuiti tali massimi. Indicando la generica altezza di pioggia con la variabile x , con $P(x)$ la sua distribuzione di probabilità, con N la numerosità della popolazione campionaria e con $P_N(x)$ la distribuzione dei massimi valori di x , in base all'assioma della probabilità composta (Maione e Moisello) discende la seguente relazione:

$$P_N(x) = P(x)^N \quad (2)$$

Perciò la distribuzione in probabilità del massimo del campione è immediatamente ricavabile dalla variabile originaria, nota la dimensione N .

A tal proposito in idrologia esistono espressioni matematiche a cui la distribuzione $P_N(x)$ tende asintoticamente all'aumentare di N . Si tratta di funzioni parametriche del tipo,

$$P(x; \Omega(d)) \quad (3)$$

dove l'insieme dei parametri Ω viene stimato dalle osservazioni sperimentali della matrice dati. In idrologia sono molto note tre famiglie di distribuzioni asintotiche denominate di primo, secondo e terzo tipo e si distinguono tra loro dal modo in cui la funzione di probabilità cumulata (CDF) tende ad uno.

Tuttavia, poiché nelle applicazioni pratiche si è interessati ai valori massimi di altezze di pioggia, la (2) viene di fatto impiegata in forma inversa, ossia si esplicita in tale espressione la x in funzione della durata, la quale diviene così la variabile indipendente.

In Italia come in altri paesi europei la curva di possibilità pluviometrica viene scritta in forma monomia, con una legge di potenza del tipo:

$$h(d) = ad^n \quad (4)$$

Ove h indica l'altezza di pioggia caduta. Nello specifico applicare questo discorso in riferimento ad una determinata distribuzione asintotica significherà usare direttamente od indirettamente tali funzioni asintotiche, al fine di stimare i parametri a ed n da inserirsi nella (4). Ricordiamo a tal proposito il loro significato:

- a è l'altezza di pioggia per una durata unitaria dell'evento piovoso (1 ora) ed è chiamata coefficiente pluviometrico orario; dimensionalmente è espresso in $\text{mm}/(\text{ore}^n)$.
- n è detto esponente di scala ed è un parametro dipendente dal tempo di ritorno, di cui si parlerà in seguito. In particolare, poiché n si trova all'esponente, governa la forma o meglio l'andamento della curva.

3.1 LA DISTRIBUZIONE DEL I TIPO

La distribuzione del primo tipo è anche detta distribuzione di Gumbel ed è molto adoperata nelle applicazioni idrologiche. In letteratura è spesso denominata con la sigla EV 1, dall'acronimo inglese *extreme value*. La sua caratteristica sta nel fatto che la distribuzione di probabilità $P(x)$ della variabile originaria per grandi valori di x e per N che tende ad infinito, può essere approssimata ad una distribuzione esponenziale tendente ad uno (Maione et al.). Dunque richiamandosi alla (4) si può scrivere la $P_N(x)$ come:

$$P_N(x) = (1 - e^{-\lambda x})^N \quad (5)$$

Si tenga presente che si parla di funzioni di densità cumulata e che ci si riferisce sempre a probabilità di non superamento di un dato evento, da qui il complemento ad uno nella (5). Noto che λ è il parametro caratteristico della distribuzione esponenziale, l'espressione (5) può essere riscritta nel seguente modo:

$$P_N = \left[1 - \frac{1}{N} e^{\frac{-(x-u)}{\alpha}} \right]^N \quad (6)$$

Sulla base di quanto finora detto, facendo il passaggio al limite per N all'infinito, otteniamo la forma di distribuzione asintotica di Gumbel, indicata qui con F(x).

$$F(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} P_N = e^{-e^{-\frac{(x-u)}{\alpha}}} \quad (7)$$

L'approssimazione dei massimi con la EV 1 sarà migliore all'aumentare della dimensione N della popolazione campionaria. Si ricordi inoltre che tale distribuzione può avvalersi di una espressione ridotta; sostituendo infatti nella (7) la variabile

$$y = \frac{(x-u)}{\alpha} \quad (8)$$

la funzione di Gumbel porge nella seguente forma:

$$F(y) = e^{-e^{-y}} \quad (9)$$

Ovviamente esiste anche la funzione densità di probabilità della Gumbel ed è ricavabile dalla (9) facendo la derivata prima di F.

$$f(y) = \frac{dF(y)}{dy} = e^{-(e^{-y}-y)} dy \quad (10)$$

Considerando nuovamente la distribuzione in x della (7), la media e sqm sono pari a:

$$\mu = \frac{0.5772}{\alpha} + u \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{6}} \quad (12)$$

Invertendo la (11) e la (12) si ricavano i parametri caratteristici della distribuzione del I tipo in funzione della media e della deviazione standard campionari da sostituirsi come stime in luogo di quelle teoriche. Perciò indicando d'ora in avanti m come la media campionaria ovvero lo stimatore di μ ed s come lo stimatore indistorto della standard deviation si ottengono le espressioni (13) e (14).

$$\alpha = 0.779s \quad (13)$$

$$u = m - 0.5772\alpha \quad (14)$$

α , detto parametro di scala, dipende solamente dalla scarto quadratico medio ed è una misura di dispersione dei valori attorno alla media, inoltre controlla la forma del grafico. Minore è α e più addensata risulta la distribuzione; perciò in termini grafici la curva sarà più appuntita. Considerando la (14) si evince che u , detto anche parametro di posizione, dipende sia dalla media che dalla deviazione standard ed inoltre coincide con la moda della distribuzione. Questo parametro controlla la posizione del grafico (Maione e Moisello), aumentarne il valore significa infatti far scorrere la curva in avanti lungo l'asse delle ascisse senza deformarla (fig.11)

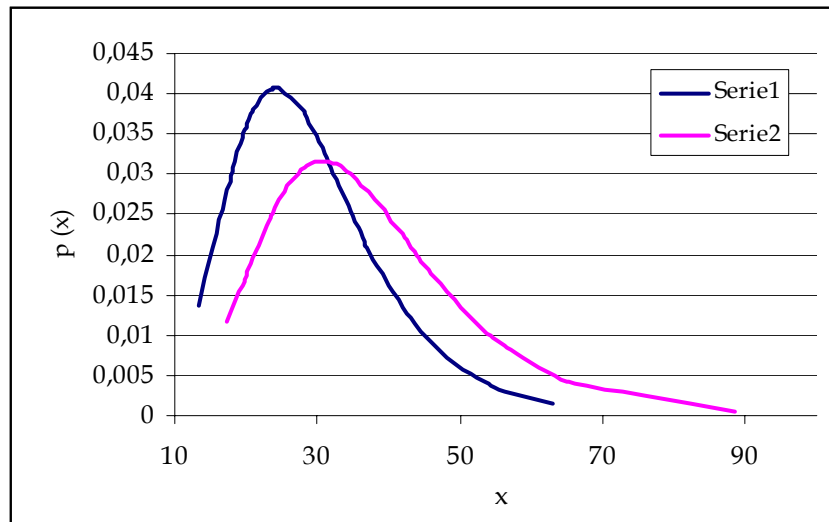


Fig. 11: esempi di EV 1. La serie 1 porge $\alpha=9,04$ ed $u=24,2$, mentre la serie 2 ha i seguenti parametri: $\alpha=11,6$; $u=30,7$

3.1.1 Metodo dei quantili regolarizzati

Poiché, come già specificato, l'obiettivo finale è l'elaborazione della curva segnalatrice, è necessario stimare i parametri a ed n della (4), una volta stabilito di adottare come distribuzione asintotica dei massimi la distribuzione di Gumbel. Un possibile metodo è quello dei quantili regolarizzati. L'aggettivo deriva dal fatto che la procedura si basa sulla regolarizzazione della previsione in riferimento ad uno specifico tempo di ritorno T espresso in anni. Fissato un evento di precipitazione intensa o di piena, si intende per tempo di ritorno il tempo che mediamente si deve attendere, perché tale evento si uguagliato o superato. Si tenga presente che, detta P la probabilità di non superamento dell'altezza di pioggia prefissata h_f ($P=P[h < h_f]$), il tempo di ritorno è uguale a:

$$T = \frac{1}{1-P} \quad (15)$$

E poiché il denominatore verosimilmente non sarà mai nullo la (15) è esplicitabile in P, probabilità che in questo contesto equivale concettualmente alla frequenza relativa cumulata F.

$$P = F(h_T) = 1 - \frac{1}{T} = \frac{T-1}{T} \quad (16)$$

Per giungere alla stima della curva segnalatrice dapprima si deve esplicitare il quantile x ovvero h nella (7) esprimendo la CDF in funzione del tempo di ritorno come indicato nella (16). Si ottiene così le seguente espressione:

$$h = u - \alpha \ln \left[\ln \left(1 - \frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (17)$$

A questo punto si deve fare quanto segue:

Si sceglie un tempo di ritorno d'interesse T.

Presa in considerazione una durata standard $\Delta\tau$ (1, 3, 6, 12, 24 ore) con cui sono stati misurati i massimi, si calcolano per essa i parametri di scala e di luogo α ed u, della distribuzione di Gumbel. Ciò ovviamente presuppone il preventivo calcolo della media e della deviazione standard da inserirsi nella (13) e nella (14).

Inseriti nella (17) i parametri trovati al punto b. ed il valore di T prefissato, si calcola l'altezza di pioggia.

Si ripetono i punti b. e c. per tutte le durate standard di campionamento $\Delta\tau$.

Si consideri a questo punto la (4). Se poniamo a logaritmo naturale entrambi i membri si ottiene l'espressione (18), che nel piano logaritmico $\ln(d) \div \ln(h)$ rappresenta una retta.

$$\ln[h_d(T)] = \ln[a(T)] + n(T) \ln(d) \quad (18)$$

A questo punto operando una regressione lineare dei logaritmi naturali di h_i di cui al punto c. sui logaritmi delle rispettive durate disposte in maniera crescente (tab. 4), si ottiene la retta che interpola al meglio la dispersione dei punti $[\ln d_i; \ln h_i]$ come in fig.12.

d(ore)	h	ln d	ln h
1	44,67	0	3,80
3	57,10	1,10	4,04
6	65,55	1,79	4,18
12	79,26	2,48	4,37
24	90,54	3,18	4,51

Tab. 4: altezze d'acqua stimate sulle rispettive durate

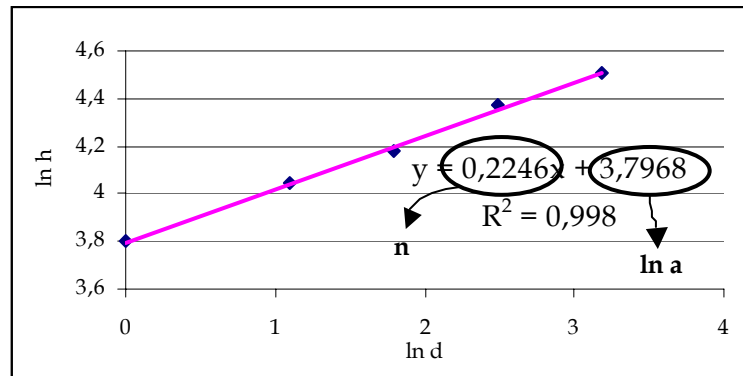


Fig. 12: retta interpolante dei punti sperimentali dal cui coefficiente angolare ed intercetta si ricavano rispettivamente i parametri n ed a della curva segnalatrice.

Il coefficiente angolare e l'intercetta di tale retta sono proprio i parametri n ed a. In realtà dal momento che l'intercetta sull'asse delle ordinate equivale al logaritmo naturale di a, basta porre un elevamento a potenza di e, per ottenere il coefficiente pluviometrico orario della curva segnalatrice. Così facendo la curva segnalatrice è stata stimata. Naturalmente un valore prossimo all'unità del coefficiente di correlazione lineare R^2 della retta interpolante è garanzia di una buona stima dei parametri a ed n. Si ricordi tuttavia che la curva ottenuta è valida esclusivamente per il tempo di ritorno prescelto al punto a). Quindi, per ricavare la curva di possibilità pluviometrica per un altro valore di T, sarà necessario ripetere la procedura sovraesposta. A tal proposito si ricordi che i tempi di ritorno utilizzati nel presente lavoro sono 5,10,25 e 50 anni. A titolo di esempio in figura 13 si osservi un rappresentazione grafica di una curva segnalatrice della stazione di Genivolta per un tempo di ritorno di 10 anni.

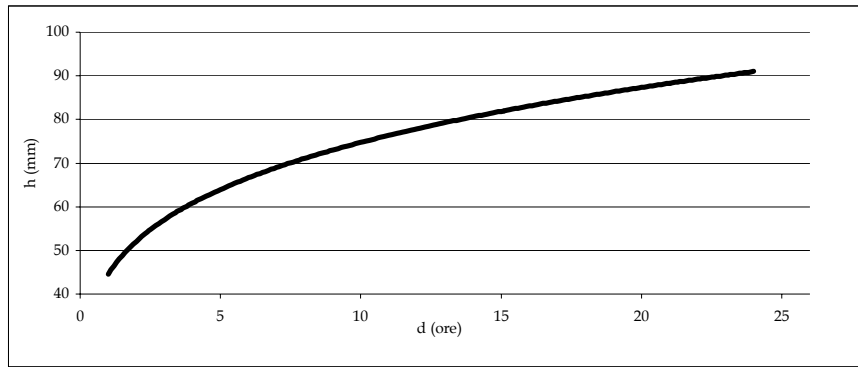


Fig. 13: curva di possibilità pluviometrica della stazione di Genivolta ottenuta col metodo dei quantili regolarizzati per un tempo di ritorno decennale.

In particolare è opportuno osservare come la curva tenda ad appiattirsi man mano che ci si sposti in avanti sull'asse delle ascisse. Un simile comportamento trova la sua spiegazione in natura, in quanto è appurato che all'aumentare della durata dell'evento piovoso l'intensità di precipitazione tende a diminuire.

3.1.2 Metodo vincolato

Un altro metodo applicabile per la stima della curva segnalatrice è quello vincolato, applicabile qualora i coefficienti di variazione delle varie durate siano pressoché costanti. Se tale ipotesi fosse verificata, si consideri un unico valore di CV, media di tutti i coefficienti di variazione secondo la (19).

$$CV^* = \sqrt{\frac{1}{N} \sum CV_i^2} \quad (19)$$

A questo punto mediante alcuni passaggi matematici è possibile ricondurre la (17) all'espressione (20), dove per θ si intende il rapporto α/u esprimibile in funzione di CV^* .

$$h = u \left\{ 1 - \theta \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} \quad (20)$$

$$\theta = \frac{\alpha}{u} = \frac{0.78CV^*}{1 - 0.45CV^*} \quad (21)$$

Volendo ora dare una forma monomia ad u , esso è esprimibile come

$$u = cd^n \quad (22)$$

per cui la (20) viene così riscritta:

$$h = c \left\{ 1 - \theta \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} d^n \quad (23)$$

La (23) rappresenta l'espressione della curva di possibilità pluviometrica col metodo vincolato. Si può dimostrare mediante altri passaggi che u è esprimibile in funzione della media campionaria tramite il valore θ come mostrato nella (24).

$$m = cd^n (1 + 0.5772\theta) \quad (24)$$

Riscrivendo m' (vedi formula (25)), la (24) assume una forma più compatta

$$m' = \frac{m}{1 + 0.5772\theta} \quad (25)$$

$$m' = cd^n \quad (26)$$

Ponendo ora a logaritmo membro a membro la (26) si ottiene la seguente espressione:

$$\ln m' = \ln c + n \ln d \quad (27)$$

Essa in un piano bilogarithmico [$\ln d - \ln m'$] rappresenta una retta i cui coefficiente angolare n ed intercetta $\ln c$ (quest'ultimo a meno di un elevamento ad e) sono proprio i parametri n e c della (22) ed ancora più importante della curva segnalatrice (23); per stimarli è sufficiente operare una regressione lineare dei $\ln m'$ per le varie durate d sui rispettivi $\ln d$ nella (27). A questo punto, dal momento che sono stati stimati tutti i coefficienti della curva di possibilità pluviometrica, per ottenere una previsione dell'altezza di acqua temibile, basta inserire nella (23) la durata d voluta al tempo di ritorno desiderato. Il vantaggio del metodo vincolato sta nel fatto che l'esponente n non dipende da T e quindi cambiando il tempo di ritorno non è più necessario, diversamente dal caso dei quantili regolarizzati ricavarli nuovamente l'esponente di scala.

In fig. 14 è possibile notare un esempio di curva segnalatrice col metodo vincolato.

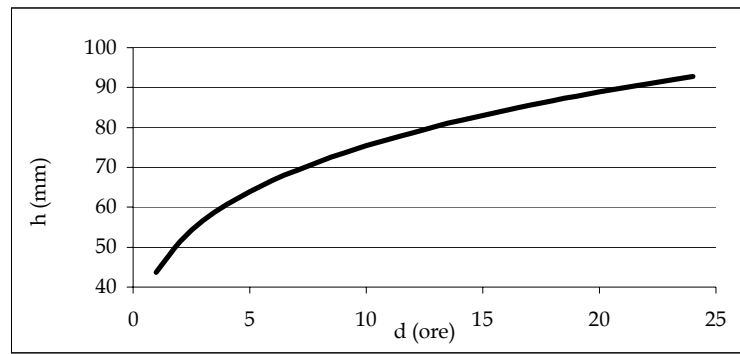


Fig. 14: curva segnalatrice con la distribuzione di Gumbel riferita a Genivolta, stimando i parametri col metodo vincolato

Malgrado l'approccio dei quantili in certe distribuzioni di probabilità possa portare ad una sovra-parametrizzazione, è stato il primo metodo utilizzato in idrologia per la stima delle curve di possibilità pluviometrica.

3.2 CENNI SULLE DISTRIBUZIONI DEL II E III TIPO

Un'altra famiglia di distribuzione asintotica dei massimi valori è quella di secondo tipo detta anche di Fréchet. Al pari della Gumbel tende ad uno, ma più lentamente ed inoltre è limitata inferiormente. La sua funzione di probabilità cumulata è:

$$P(x) = e^{-\left(\frac{x-x_0}{u-x_0}\right)^{\tilde{k}}} \quad (28)$$

dove x_0 è il limite inferiore ed u e \tilde{k} sono parametri caratteristici, in particolare \tilde{k} è sempre positivo ed è chiamato parametro di forma.

Al contrario se la distribuzione asintotica è limitata superiormente si può adottare la distribuzione del III tipo, che ha una formula molto simile alla (28) con gli stessi tre parametri, dove in questo caso x_0 costituisce il limite superiore.

$$P(x) = e^{-\left(\frac{x_0-x}{x_0-u}\right)^{\tilde{k}}} \quad (29)$$

Tuttavia questa CDF non ha nessun interesse in campo idrologico.

3.3 LA DISTRIBUZIONE GEV

Introducendo nella (28) i parametri α e \tilde{k} riscritti come indicato nella (30) e (31), la distribuzione di Fréchet assume una nuova forma [la (32)], che per $k \rightarrow 0$ coincide con la distribuzione di Gumbel.

$$\alpha = \frac{u - x_o}{k} \quad (30)$$

$$\tilde{k} = \frac{1}{k} \quad (31)$$

$$P(x) = e^{-\left[1 + \frac{k(x-u)}{\alpha}\right]^{-1/k}} \quad (32)$$

In maniera analoga sostituendo nella (29) i nuovi parametri α e k (vedi (33) e (31)), la EV 3 assume nell'aspetto una scrittura formalmente identica alla (32).

$$\alpha = \frac{x_o - u}{k} \quad (33)$$

La formula (31) viene dunque a riassumere in sé tutte le tre distribuzioni dei valori estremi a seconda del variare di k ed in particolare per:

$k \rightarrow 0$ si ha la EV1 ovvero la distribuzione di Gumbel

$k < 0$ si ha la EV2 ovvero la distribuzione di Fréchet, purché $x > (u + \alpha/k)$

$k > 0$ si ha la EV3, purché $x < (u + \alpha/k)$

Per questa ragione la (32) è chiamata distribuzione generalizzata dei valori estremi o più semplicemente GEV dall'inglese general extreme value ed è oggi giorno la distribuzione più utilizzata, qualora sia ignota a priori la forma asintotica della distribuzione dei valori estremi. Perciò è stata adottata nelle elaborazioni statistiche del presente lavoro assieme alla distribuzione di Gumbel.

La media e la varianza di tale distribuzione hanno le seguenti espressioni:

$$E[X] = u + \frac{\alpha}{k} [1 - \Gamma(1 + k)] \quad (34)$$

$$\text{var}[X] = \left(\frac{\alpha}{k}\right)^2 [\Gamma(1 + 2k) - \Gamma^2(1 + k)] \quad (35)$$

Si ricordi che la funzione Γ , che compare nella (34) e nella (35) è così definita:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{x-1} du \quad (36)$$

Perché la Γ sia definita, il generico argomento x deve essere strettamente positivo, ne consegue che k dovrà essere maggiore di -1 e di $-0,5$ rispettivamente nella (34) e nella (35).

Si ricordi che anche in questo contesto si è interessati a stimare le altezze di pioggia per un dato tempo di ritorno secondo la forma monomia citata nella (4) ovviamente con i parametri tipici della GEV. Per raggiungere tale scopo si consideri la (14). Sostituendo in $P(x)$ la legge di distribuzione della GEV si ottiene:

$$T = \frac{1}{1 - e^{-\left[1 + \frac{k(x-u)}{\alpha}\right]^{-1/k}}} \quad (37)$$

Se si esplicita la (37) in funzione di x si ricava un'equazione dove il quantile varia in funzione del tempo di ritorno:

$$x = u + \frac{\alpha}{k} \left[1 - \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)^k \right] \quad (38)$$

Indicando con $y = -\ln\left(\ln \frac{T}{T-1}\right)$ la variabile ridotta di Gumbel e ponendo $x=K_T$ noto anche come coefficiente di crescita, la (38) viene riscritta nel seguente modo:

$$K_T = u + \frac{\alpha}{k} \left(1 - e^{-ky} \right) \quad (39)$$

Indicando ora con m la media del massimo annuale di pioggia su una durata prefissata esso è esprimibile come (De Michele et al.):

$$m [h(d)] = a_1 d^n \quad (40)$$

In particolare a_1 è il coefficiente pluviometrico orario e viene espresso in mm/oreⁿ. Dal punto idrologico indica nel corso di un anno il valore atteso della massima altezza d'acqua temibile su un'ora. Invece n è il solito esponente di scala e si riferisce alla massima pioggia annuale al variare della durata da 1 a 24 ore consecutive. In maniera

del tutto analoga a quanto fatto nel par. 3.1.1 con la formula (18), ponendo a logaritmo entrambi in membri e facendo una regressione lineare $\ln(m)-\ln(d)$ si ricavano questi due coefficienti.

A questo punto l'altezza di pioggia cumulata h per un prefissato tempo di ritorno T è valutabile come (De Michele e Rosso)

$$h(d)=m \cdot K_T \quad (41)$$

Evidenziando quindi tutti i parametri coinvolti la curva segnalatrice con la GEV assume tale forma:

$$h = a_1 \left[u + \frac{\alpha}{k} \left(1 - e^{-ky} \right) \right] d^n \quad (42)$$

L'utilizzo della (42) comporta però la stima preliminare dei cinque parametri a_1 , n , α , u e k . Tolti i primi due stimabili con il metodo dei minimi quadrati poc'anzi citato, restano da ricavare gli altri tre. Per la loro stima esistono diverse metodologie. In questa sede è stato utilizzato il metodo degli L-moments. Gli L-moments sono una combinazione lineare dei metodi pesati in probabilità (che per brevità indichiamo pwm). Il pwm è definito come:

$$M_{i_{jk}} = \int_0^1 [x(F)]^i F^j (1-F)^k dF \quad (43)$$

dove $x(F)$ è il quantile ricavabile dall'inversione della CDF (funzione cumulata di probabilità) riferita in questo contesto all'altezza di pioggia. i è l'ordine del momento rispetto alla variabile e nel presente lavoro sarà sempre uguale a 1; j invece rappresenta l'ordine rispetto alla probabilità di non superamento. Infine k indica l'ordine rispetto alla probabilità di superamento, ordine che nelle applicazioni del presente lavoro sarà sempre nullo.

Per la stima degli M si può discretizzare la (43) con la (44),dove:

$$M_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i F(x_i)^j \quad (44)$$

N rappresenta la numerosità del campione

x_i è l' i -esima osservazione dell'altezza di pioggia ordinata con le altre in senso crescente

$F(x_i)$ è la probabilità di non superamento dell' i -esimo evento x_i stimabile con la formula di Gringorten

$$F(x_i) = \frac{i - 0.35}{N} \quad (45)$$

Il pregio degli L-moments è che, a prescindere dal tipo di distribuzione in esame, sono esprimibili come combinazione lineare dei pwm (Kottegoda e Rosso); in particolare

$$L_1 = M_0 \quad (46)$$

$$L_2 = 2M_1 - M_0 \quad (47)$$

$$L_3 = 6M_2 - 6M_1 + M_0 \quad (48)$$

È stato dimostrato che i tre parametri α , u e k sono esprimibili in funzione degli L-moments secondo queste espressioni:

$$\alpha = \frac{kL_2}{(1 - 2^{-k})\Gamma(1+k)} \quad (49)$$

$$u = L_1 - \frac{\alpha}{k} [1 - \Gamma(1+k)] \quad (50)$$

$$\frac{L_3}{L_2} = \frac{2(1 - 3^{-k})}{(1 - 2^{-k})} - 3 \quad (51)$$

A questo punto per stimare i tre parametri si faccia quanto segue:

- a) si prendano le altezze di pioggia della stazione in esame e le si divida ciascuna rispetto alla media, a seconda della durata di riferimento. Si otterrà così un unico array di osservazioni adimesionalizzato al posto dei cinque in precedenza (per 1,3,6,12 e 24 h).
- b) Si ordini l'array in senso crescente
- c) Si stimino per tale array i momenti pesati in probabilità M_0 (che coincide con la media aritmetica), M_1 ed M_2 usando la (44).
- d) Successivamente si calcolino i momenti L di ordine 0, 1 e 2 secondo la (46), la (47), e la (48).
- e) Si inizi a stimare il parametro k tramite la (51). Poiché tuttavia quest'ultima non è esplicitabile in funzione di k , il parametro dovrà essere stimato in maniera ricorsiva tramite l'ausilio di un comune foglio elettronico. Ossia, ipotizzato un primo valore di k , sulla base di questo si calcoli il rapporto L_3/L_2 secondo la (51) confrontandolo poi con il rapporto L_2/L_3 ricavato dai dati sperimentali, da mantenersi fisso. Dopodiché si aggiorni il valore di k fino a quando i due quozienti non giungeranno ad una sostanziale convergenza. Quando ciò sarà avvenuto, il valore ottenuto sarà una stima veritiera del vero k della distribuzione GEV.

f) Trovato k , si stimino infine i parametri α ed u con la (49) e (50).

3.4 IL TEST DI KOLMOGOROV-SMIRNOV

Una volta scelta la distribuzione asintotica dei massimi valori per la popolazione campionaria in esame, è buona norma controllare se tale distribuzione effettivamente approssimi in maniera ottimale la distribuzione probabilistica dei dati, al di là di ogni valutazione soggettiva. Per far ciò esistono in statistica delle procedure, comunemente chiamate test, che verificano quanto detto in maniera rigorosa. Ce ne sono di tanti tipi ed in questa sede si è adottato il test di Kolmogorov-Smirnov, ideato dagli omonimi studiosi. Questo metodo è *distribution free* ossia è indipendente dalla distribuzione di probabilità da testare. L'obiettivo del test è quindi quello di appurare la veridicità dell'ipotesi H_0 , che in gergo tecnico è detta ipotesi nulla, ossia che *"la distribuzione asintotica prescelta ben interpreta l'andamento reale dei dati"*.

Procedura

1. Per prima cosa si prende la popolazione campionaria in esame e la si dispone in ordine crescente. Nel caso della GEV il campione da ordinare sarà formato da tutte le altezze di pioggia adimensionalizzate rispetto alle proprie medie di durata; dopodiché a ciascun dato andrà assegnato il numero d'ordine secondo l'ordine crescente.
2. Per dimensione del campione N superiori a 20 la probabilità di non superamento P è approssimabile dalla formula:

$$P = \frac{n_i}{N+1} \quad (53)$$

dove n_i è la posizione dell' i -esimo dato nella popolazione disposta in ordine crescente.

3. Successivamente va calcolata la probabilità di non superamento di ogni singolo dato utilizzando la legge asintotica di distribuzione dei massimi posta sotto esame.
4. Come quarto passaggio si calcola in valore assoluto la differenza D_i delle due probabilità calcolate ai punti 2. e 3. per ogni elemento della popolazione campionaria e si ricerca la differenza massima.
5. Si stima poi un DN, α critico, che costituisce la statistica propria di tale test, che prescinde dalla distribuzione da testare. Si ricordi che N è la numerosità del campione ed α è l'ampiezza del test o il livello di significatività, ovvero la probabilità di accettare l'ipotesi H_0 , quando questa è falsa, livello che nel presente lavoro è stato fissato a 5%. A tal proposito i valori di DN, α si trovano tabulati su un qualsiasi manuale di statistica.

6. A questo punto se il D massimo è inferiore a più uguale al D critico, il test è superato e quindi la distribuzione probabilistica scelta rappresenta bene l'andamento sperimentale dei dati.

RISULTATI SPERIMENTALI

4.1 LA SERIE STORICA DI GENIVOLTA

Nel par. 2.3 si è spiegato che la serie storica di Genivolta a differenza di quelle afferenti altre stazioni pluviometriche ha due provenienze diverse. I dati dal 1955 al 1979 provengono dagli annali idrologici, mentre le altezze di pioggia riferite ai restanti ventitre anni sono state lette nel corso del presente lavoro dalle strisciate del pluviografo in dotazione al Consorzio. Ci si pone ora il problema se le due serie di origini differenti possano dar luogo ad un'unica popolazione campionaria. Del resto i due set di dati sono stati presi in tempi diversi e forse con due pluviografi differenti. Inoltre quanto meno due persone se non più hanno curato la redazione di queste serie storiche; è da escludersi in effetti che negli anni 50-70 la lettura dei dati avvenisse tramite computer. In forza di ciò si potrebbero avere:

- due differenti errori sistematici, visto che i pluviografi forse potrebbero non essere dello stesso modello o marca.
- errori casuali di diversa entità legati all'errore umano nella lettura dei grafici.

Al fine di valutare la possibilità di una fusione dei due set dati, sono stati calcolati per ciascuno di essi media e deviazione standard campionari e coefficiente di variazione (CV), intendendo con quest'ultimo termine il rapporto della deviazione standard sulla media; il tutto in riferimento ad ogni durata. A tal proposito si osservino le tabb. 5 e 6.

anni 1955-1979					
	1h	3h	6h	12h	24h
media (mm)	30,2	39,7	45,4	52,8	60,8
sqm (mm)	13,6	17,3	18,5	20,5	22,2
CV	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4

Tab. 5: indici statistici d'interesse per le serie storiche degli anni 1955-1979

anni 1980-2003					
	1h	3h	6h	12h	24h
media (mm)	28,5	35,1	42,8	52,5	63,8
sqm (mm)	9,7	12,4	14,4	20,7	22,0
CV	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3

Tab. 6: indici statistici d'interesse per le serie storiche degli anni 1980-2003

Considerando gli indici caratteristici delle due serie in questione si può dire che:

- A. le medie delle due serie per ogni durata hanno valori paragonabili, ad esempio per le 12 ore abbiamo 52,8 mm per gli anni 1955-1979 contro 52.5 mm per degli anni 1980-2003 e comunque per gli altri casi abbiamo variazioni di pochi millimetri.
- B. le deviazioni standard della serie 1980-2003 sono dello stesso ordine di grandezza della serie degli annali idrologici, anzi lo scarto quadratico medio della serie più recente presenta valori addirittura inferiori. Ciò significa che la lettura manuale delle strisciate è avvenuta in maniera corretta e con un adeguato grado di precisione.
- C. Tutti i coefficienti di variazione sono inferiori all'unità. Ciò implica che la deviazione standard è di un ordine di grandezza inferiore alla media e questo in ultima analisi significa che, poiché i dati sono distribuiti normalmente attorno alla media in un range $m \pm s$, il singolo dato non può essere più grande del doppio o più piccolo della metà della media. Perciò c'è una dispersione contenuta dei dati attorno al valore centrale.

In definitiva, in forza delle considerazioni fatte nei punti A, B e C, si può concludere che la fusione delle due serie storiche in un'unica popolazione campionaria è un'operazione lecita. Infine come considerazione a latere in favore dell'attendibilità delle strisciate si tenga presente che durante la lettura è emerso che le precipitazioni annuali più intense di più lunga durata (12 e 24 h) ricadono per la quasi totalità nella seconda metà di settembre e nel mese di ottobre o in primavera; mentre quasi nessuna precipitazione di rilievo è stata segnalata nei mesi invernali. Tutto ciò è in perfetta sintonia col comportamento del clima padano, che prevede il massimo annuale di precipitazione in pieno autunno, massimo secondario in periodo primaverile ed il minimo in inverno. Per quanto concerne le precipitazioni di breve durata (ad esempio 1h), ricadono in estate e sono associate ai temporali, ossia ad eventi per l'appunto brevi e di forte intensità, tipici del clima della zona, come spiegato nel par. 1.1.

4.2 L'OMOGENEITÀ DEI DATI

In termini di priorità la seconda questione da valutare è l'opportunità o meno di considerare paragonabili le serie di tutte le stazioni in esame. Ciò significa verificare se i valori delle altezze di pioggia siano tra loro omogenei. Per far ciò come primo passo si sono poste le osservazioni sperimentali di tutte le stazioni in un'unica popolazione, suddivisa in base alle durate canoniche $\Delta\tau$ e per essa si sono calcolate le medie, le deviazioni standard campionarie ed i coefficienti di variazione.

parametri	1h	3h	6h	12h	24h
m	27,5	36,5	43,9	51,9	62,4
s	11	15	17	20	22
CV	0,42	0,41	0,39	0,38	0,36

Tab. 7: media (m), deviazione standard (s) campionarie e coefficiente di variazione (CV) di tutti i dati di pioggia delle stazioni inglobati in un'unica popolazione.

In particolare tutti i CV sono risultati al di sotto dell'unità e ciò significa che gli scarti quadratici medi risultano sempre di un ordine di grandezza inferiori in confronto alle rispettive medie. Tutto questo è già la prova di un buon addensamento dei dati sperimentali attorno ai valori centrali, che sono più o meno della stessa entità. Quanto detto diviene più palese se si osserva la tab. 8 dove sono riportati i soliti indici questa volta per ciascuna stazione.

Stazioni	1h			3h			6h			12h			24h		
	m	s	CV	M	s	CV	m	s	CV	m	s	CV	m	s	CV
Bozzolo	30,20	14,05	0,47	43,18	20,06	0,46	51,12	21,74	0,43	57,10	21,07	0,37	69,69	24,67	0,35
Casalmagg.	27,76	11,62	0,42	36,67	12,64	0,34	43,91	14,67	0,33	52,87	21,90	0,41	64,03	30,89	0,48
Codogno	28,28	12,03	0,43	37,21	13,55	0,36	44,25	15,26	0,34	52,76	19,92	0,38	64,42	24,11	0,37
Crema	28,18	8,69	0,31	35,58	11,16	0,31	42,17	14,29	0,34	50,66	16,06	0,32	59,69	16,84	0,28
Cremona	25,00	10,78	0,43	33,63	14,40	0,43	40,66	18,77	0,46	50,77	23,77	0,47	61,53	25,73	0,42
Fontanella	26,12	9,36	0,36	35,06	11,33	0,32	41,87	14,01	0,33	49,86	15,50	0,31	61,35	17,08	0,28
Genivolta	29,37	11,74	0,40	37,43	15,09	0,40	44,12	16,44	0,37	52,68	20,39	0,39	62,30	21,67	0,35
Lodi	25,02	8,15	0,33	33,27	9,06	0,27	40,63	13,63	0,34	47,05	18,57	0,39	55,25	20,63	0,37
Orzinuovi	27,06	10,90	0,40	34,26	12,48	0,36	42,29	12,90	0,30	49,67	14,92	0,30	59,43	13,15	0,22
Pieve S.G.	29,50	15,30	0,52	39,01	21,97	0,56	46,74	22,87	0,49	55,27	25,86	0,47	65,54	28,92	0,44
S. Matteo	21,81	8,16	0,37	32,34	11,20	0,35	39,93	12,71	0,32	47,34	15,40	0,33	57,12	16,25	0,28
Treviglio	28,73	12,68	0,44	38,52	18,00	0,47	47,22	19,70	0,42	53,96	18,82	0,35	64,54	19,68	0,30

Tab. 8: indici statistici d'interesse di tutte le serie storiche

Si nota che le medie a parità di durata presentano una certa variabilità, ma ricadono comunque in un range abbastanza ristretto. In definitiva si può dunque riaffermare che i

dati sono paragonabili in termini statistici e che quindi non si commette errore se vengono impiegati tutti assieme per le finalità proposte nel presente lavoro.

Non si deve poi dimenticare che, ad avvallare questa ipotesi in aggiunta alle considerazioni statistiche già di per sé valide, vi sono anche considerazioni di carattere prettamente ambientale. In primo luogo siamo nel cuore della Pianura Padana, in un territorio pianeggiante, privo di asperità, vallate e di grossi sbalzi altimetrici che potrebbero determinare piovosità tanto differenti. Infatti si va dai 19 m s.l.m. di S. Matteo fino ai 126 m s.l.m. di Treviglio. In secondo luogo dal punto di vista territoriale lo studio viene condotto in uno spazio abbastanza ristretto ovvero in un zona poco più grande della provincia di Cremona che di per sé è abbastanza piccola (1.770,57 km²). Infine come già ribadito nel par. 1.1 la Pianura Padana presenta un clima stabile e soprattutto uno stesso regime pluviometrico su tutto il suo territorio.

4.3 GLI ESITI CON LA DISTRIBUZIONE EV 1

Dal momento che i dati in possesso sono tutti massimi annuali di pioggia, in primo luogo è stato immediato proporre come andamento probabilistico dei dati una distribuzione EV 1. Per avere un riscontro visivo ed immediato dell'andamento sperimentale dei dati su quello probabilistico, essi possono essere messi a confronto sulla carta probabilistica. A titolo di esempio si osservino le figg. 15, 16, 17, 18 e 19 riferite alla stazione di Genivolta.

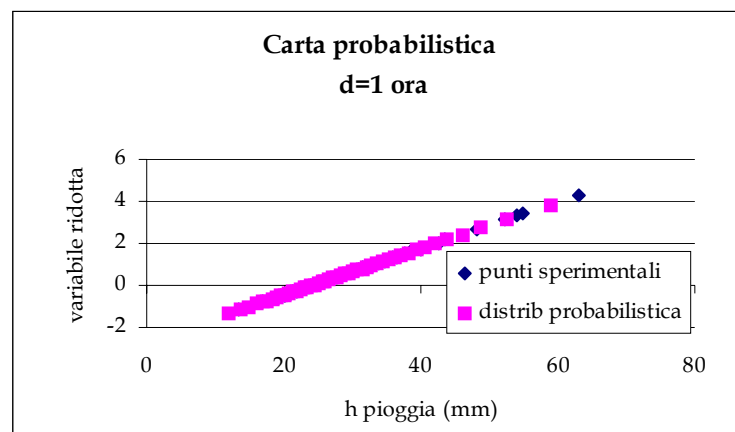


Fig. 15: carta probabilistica della serie storica di Genivolta per la durata di 1 h

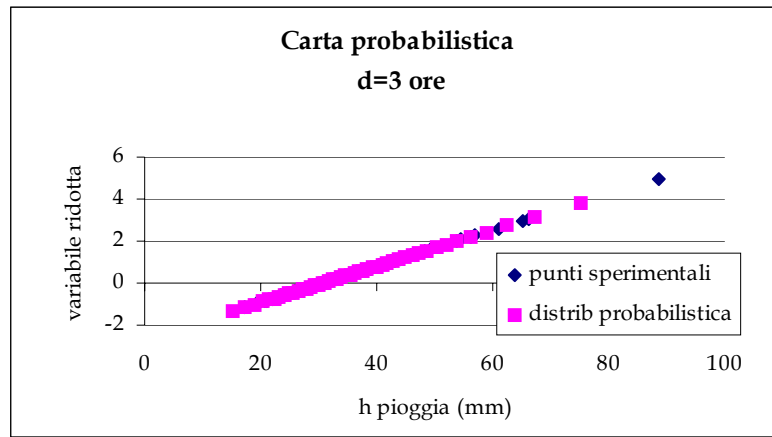


Fig. 16: carta probabilistica della serie storica di Genivolta per la durata di 3 h

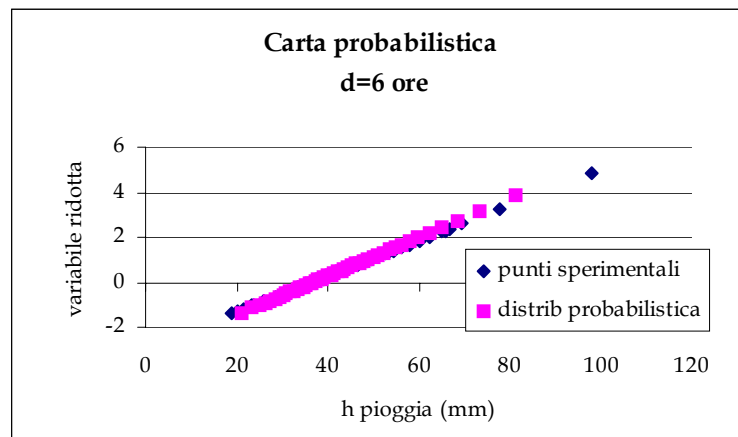


Fig. 17: carta probabilistica della serie storica di Genivolta per la durata di 6 h

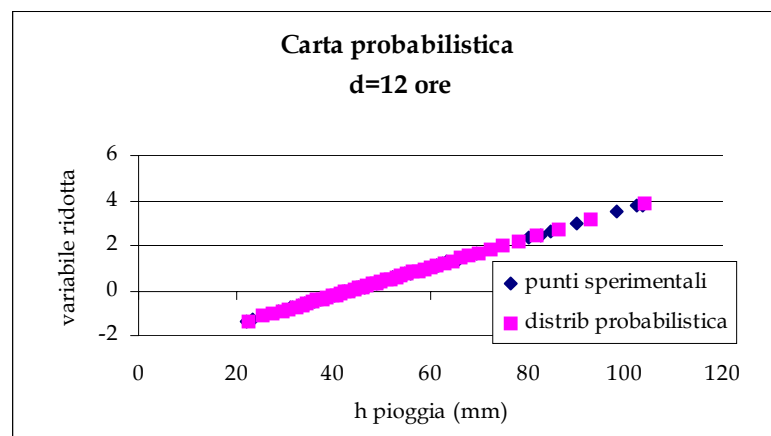


Fig. 18: carta probabilistica della serie storica di Genivolta per la durata di 12 h

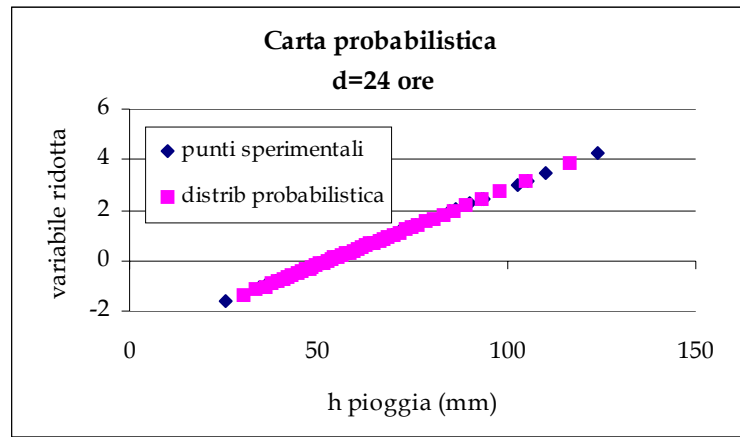


Fig. 19: carta probabilistica della serie storica di Genivolta per la durata di 24 h

Le dispersioni in blu indicano gli andamenti sperimentali dei dati, mentre le dispersioni in fucsia rappresentano le distribuzioni probabilistiche. A colpo d'occhio potremmo già affermare che nel caso di questa stazione la distribuzione di Gumbel ben interpreta i dati misurati, in quanto le due dispersioni sono ben appaiate, quasi coincidenti. Ciononostante, per decretare a livello formale la buona performance di una distribuzione in probabilità, non ci si può avvalere di una valutazione a spanne e comunque intrinsecamente soggettiva; al contrario si deve ricorrere ad un approccio oggettivo e rigoroso. Per questa ragione per ciascuna stazione è stato effettuato il test di Kolmogorov, i cui esiti sono riportati in tab. 9.

Bozzolo	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,070	0,069	0,083	0,100	0,103
D _{critico} 0,2420	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
Casalmaggiore	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,118	0,068	0,085	0,136	0,088
D _{critico} 0,2600	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
Codogno	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,068	0,080	0,067	0,155	0,156
D _{critico} 0,2270	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
Crema	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,128	0,069	0,127	0,103	0,103
D _{critico} 0,2124	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
Cremona	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,080	0,070	0,110	0,099	0,092
D _{critico} 0,1786	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
Fontanella	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,112	0,133	0,055	0,078	0,066
D _{critico} 0,2460	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
Genivolta	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,138	0,064	0,060	0,058	0,070
D _{critico} 0,2005	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
Lodi	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,104	0,080	0,071	0,129	0,128
D _{critico} 0,2690	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
Orzinuovi	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,061	0,110	0,106	0,111	0,105
D _{critico} 0,2460	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
Pieve S. Giacomo	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,137	0,109	0,111	0,132	0,098
D _{critico} 0,2270	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
S. Matteo	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,096	0,114	0,071	0,104	0,092
D _{critico} 0,2700	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !
Treviglio	1h	3h	6h	12h	24 h
max [abs (P(H) -F(H))]	0,136	0,113	0,080	0,107	0,072
D _{critico} 0,2074	OK !	OK !	OK !	OK !	OK !

Tab. 9: esiti del test di Kolmogorov per la distribuzione di Gumbel

Si nota che le differenze massime tra la frequenza relativa cumulata stimata col metodo di Gringorten e quella proposta dalla EV 1 (in funzione dell'altezza di pioggia misurata) sono sempre nettamente inferiori ai corrispettivi D critici; e quanto detto è valido per qualsiasi serie storica. Sulla base di ciò è possibile affermare che la EV 1 sia proponibile come distribuzione asintotica dei massimi valori.

4.3.1 Metodo dei quantili regolarizzati

In questo paragrafo si vuole discutere dei risultati delle elaborazioni statistiche effettuate col metodo dei quantili regolarizzati, sempre in riferimento alla distribuzione di Gumbel. A tale scopo in tab. 10 sono riportati i parametri caratteristici della curva segnalatrice per i tempi di ritorno di cinque, dieci, venticinque e cinquant'anni. Si nota innanzitutto che gli R^2 approssimati alla seconda cifra decimale sono prossimi ad uno e ciò dimostra la bontà della regressione lineare, necessaria alla stime del coefficiente pluviometrico orario e di scala di cui al par. 3.1.1. Inoltre detti coefficienti al variare del tempo di ritorno presentano valori piuttosto simili. Spiccano però i coefficienti pluviometri di Pieve S. Giacomo e Bozzolo che sono i più elevati.

stazione	T = 5 anni			T = 10 anni			T = 25 anni			T = 50 anni		
	R^2	a (T)	n (T)	R^2	a (T)	n (T)	R^2	a (T)	n (T)	R^2	a (T)	n (T)
Bozzolo	0,97	42,19	0,23	0,96	51,06	0,22	0,95	62,29	0,21	0,95	70,63	0,21
Casalmaggiore	0,99	34,78	0,27	0,98	40,64	0,28	0,96	48,03	0,29	0,96	53,52	0,29
Codogno	1,00	36,18	0,25	0,99	42,74	0,25	0,99	51,03	0,24	0,99	57,17	0,24
Crema	1,00	34,22	0,24	1,00	39,45	0,23	0,99	46,04	0,23	0,99	50,94	0,23
Cremona	1,00	32,56	0,29	1,00	38,89	0,29	1,00	46,90	0,29	0,99	52,83	0,29
Fontanella	1,00	32,81	0,25	1,00	45,23	38,30	1,00	45,23	0,24	1,00	50,38	0,23
Genivolta	1,00	37,62	0,23	1,00	44,56	0,22	1,00	53,33	0,22	1,00	59,83	0,22
Lodi	1,00	30,67	0,27	0,99	35,06	0,27	0,99	40,59	0,28	0,98	44,70	0,29
Orzinuovi	1,00	34,66	0,22	1,00	41,15	0,20	0,99	49,38	0,18	0,99	55,49	0,17
Pieve S.G.	1,00	41,24	0,24	0,99	50,72	0,23	0,99	62,71	0,22	0,98	71,60	0,22
S. Matteo	0,99	28,62	0,29	0,99	33,56	0,28	0,99	39,80	0,27	0,99	44,43	0,26
Treviglio	0,99	39,10	0,23	0,97	47,28	0,21	0,96	57,65	0,20	0,95	65,34	0,19

Tab. 10: parametri caratteristici delle curve di possibilità pluviometriche con la distribuzione di Gumbel (metodo dei quantili regolarizzati)

Nelle figg. 20, 21, 22 e 23 sono riportate le curve segnalatrici di ogni stazione raggruppate in base al tempo di ritorno.

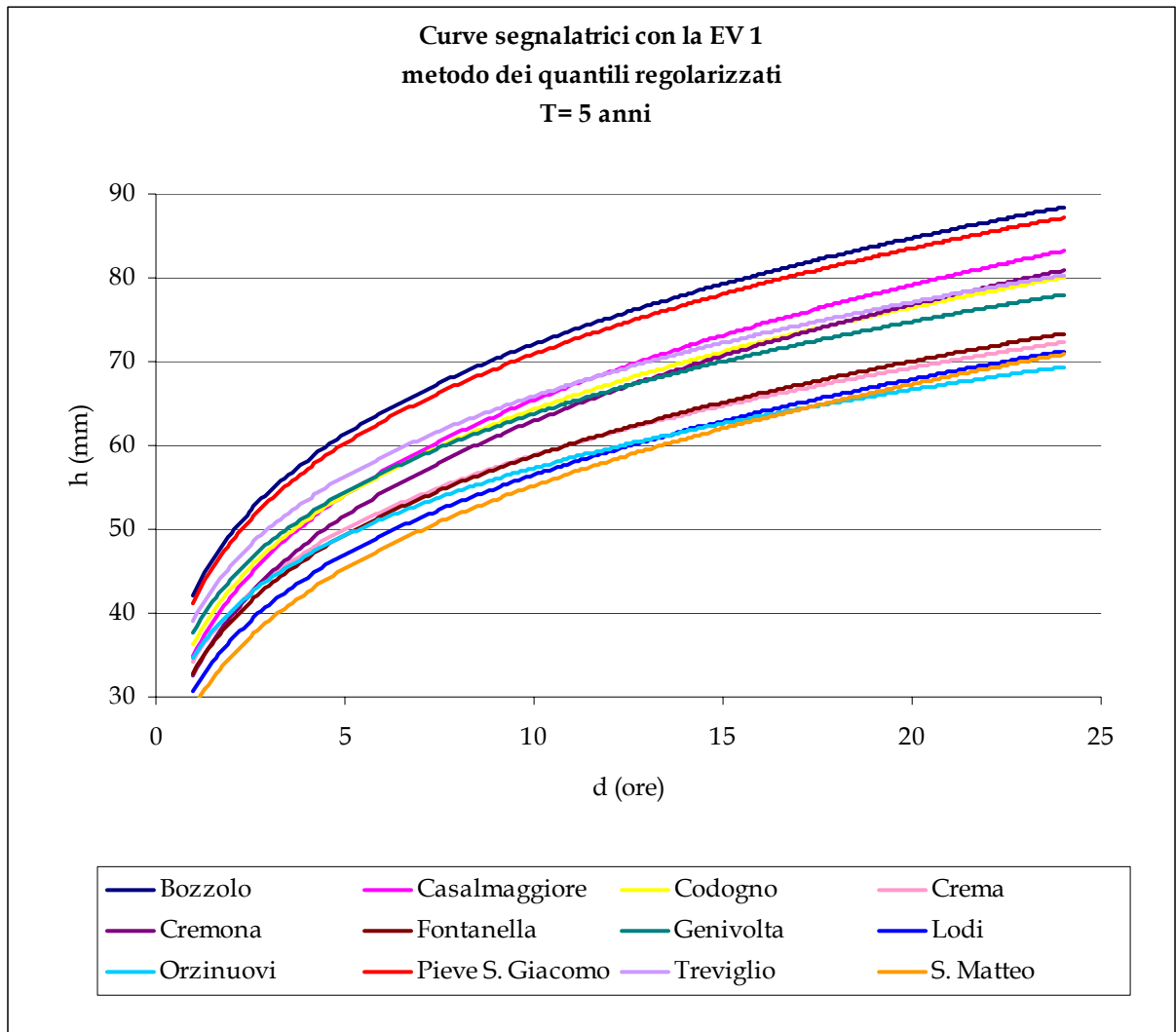


Fig. 20: curve segnalatrici ricavate con la distribuzione di Gumbel (metodo dei quantili regolarizzati), riferite ad un tempo di ritorno di cinque anni

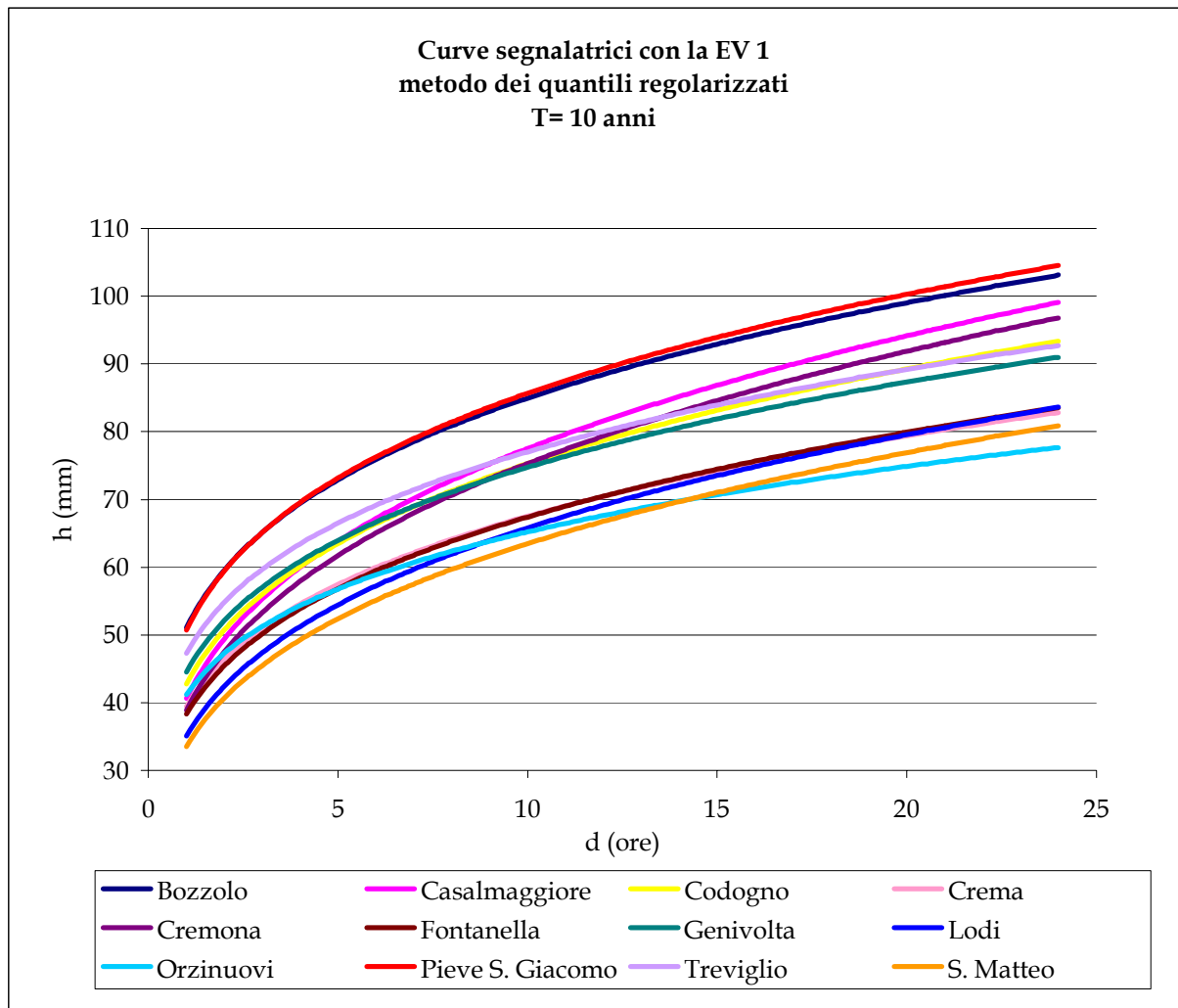


Fig. 21: curve segnalatrici ricavate con la distribuzione di Gumbel (metodo dei quantili regolarizzati), riferite ad un tempo di ritorno di dieci anni

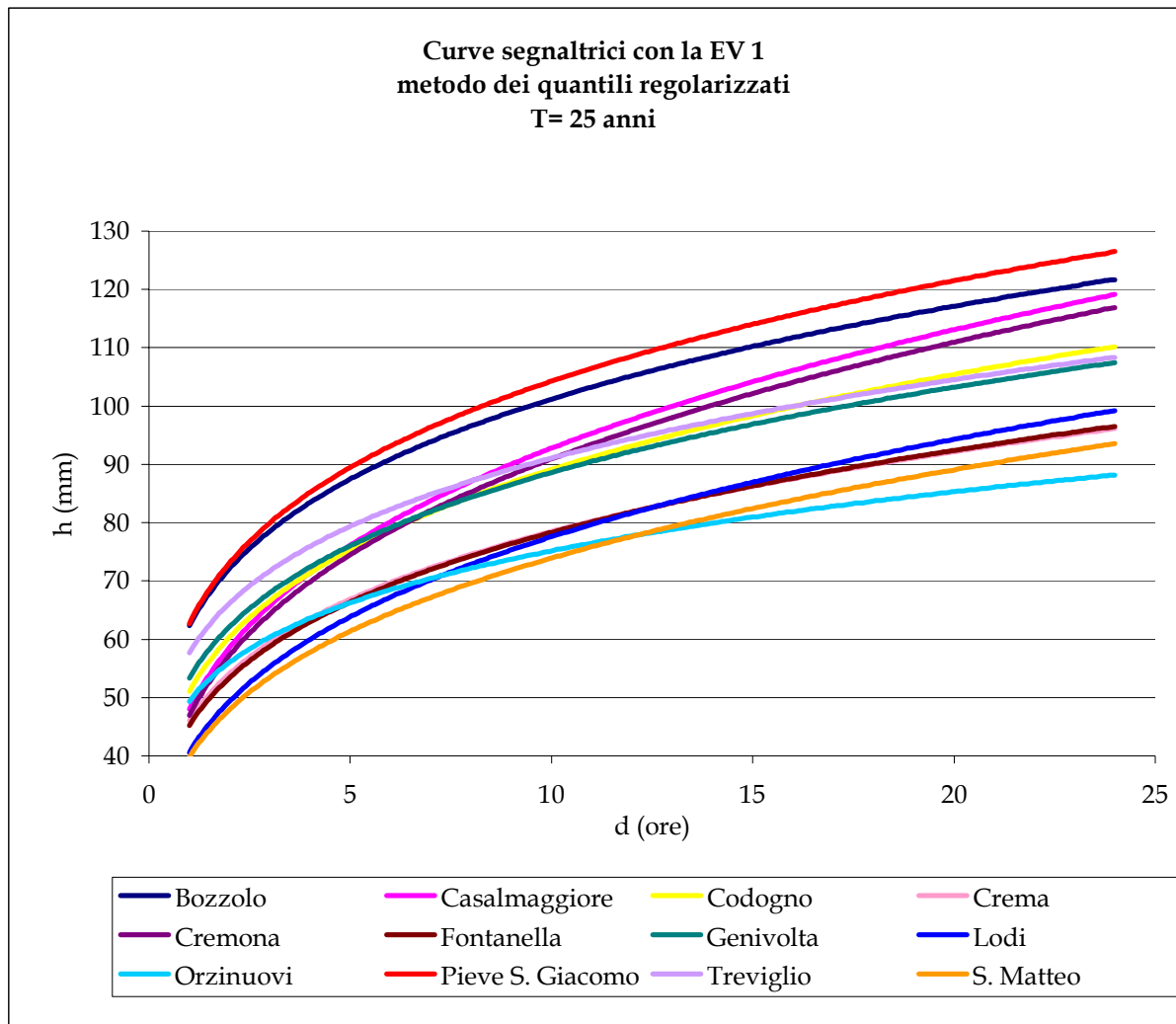


Fig. 22: curve segnaltrici ricavate con la distribuzione di Gumbel, (metodo dei quantili regolarizzati), riferite ad un tempo di ritorno di venticinque anni

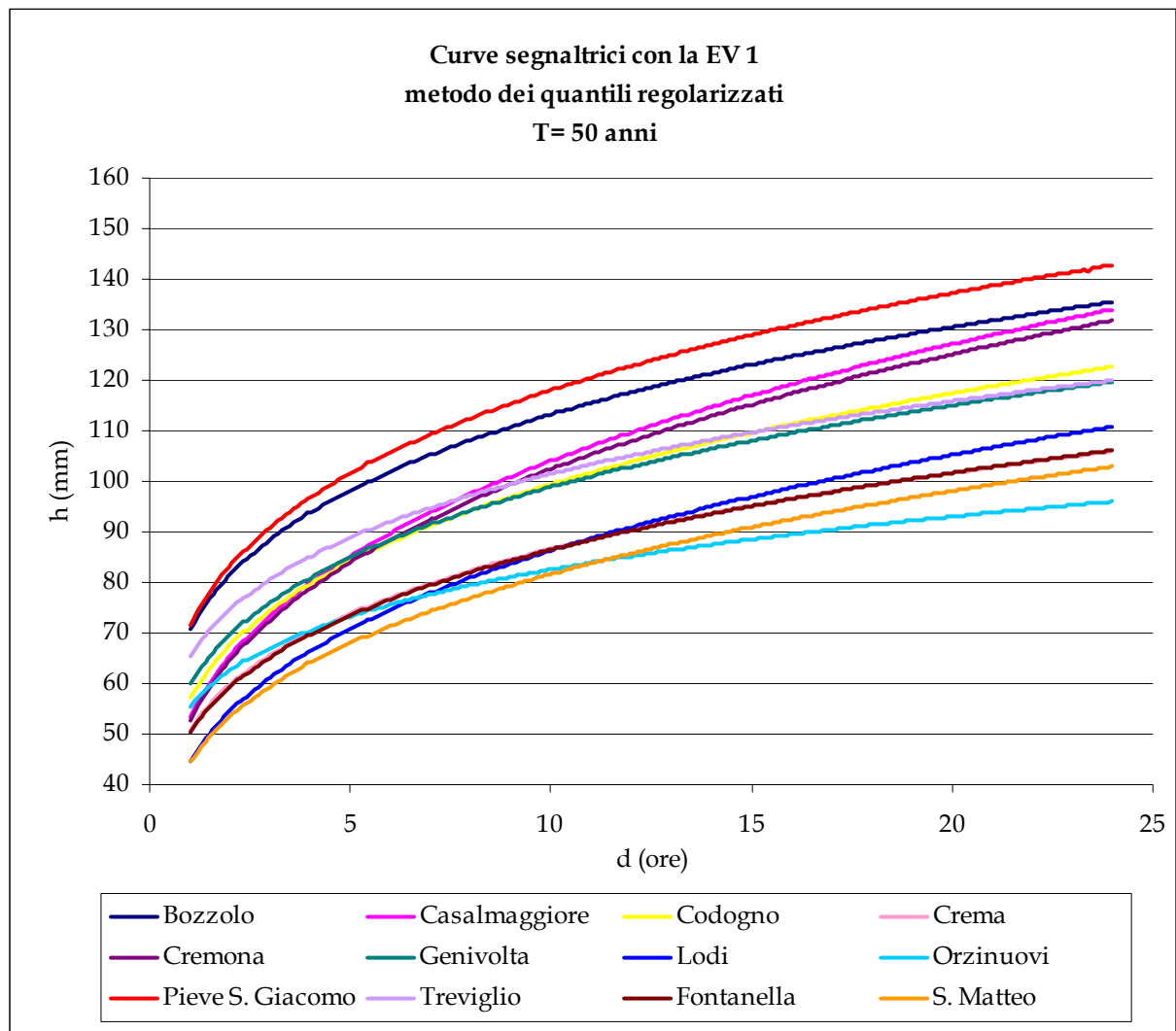


Fig. 23: curve segnaltrici ricavate con la distribuzione di Gumbel, (metodo dei quantili regolarizzati), riferite ad un tempo di ritorno di cinquant'anni

La prima questione da osservare è che le curve di possibilità pluviometrica presentano, dopo un accavallamento iniziale nelle prime ore, un ordine ben definito e costante in tutti i grafici dove si apprezza un netto distacco delle curve di Pieve San Giacomo e di Bozzolo le quali forniscono i più alti valori, divario già preventivabile dalla semplice osservazione dei coefficienti pluviometrici orari poc'anzi citati.

Tutto ciò è positivo, in quanto è in pieno accordo con le misurazioni sperimentali delle piogge, dove è emerso che proprio Bozzolo, Pieve S. Giacomo sono le località con le altezze d'acqua mediamente maggiori. Il fatto dunque che le loro curve segnaltrici siano collocate più in alto è una naturale conseguenza, nonché la prova che le elaborazioni siano state svolte in maniera corretta e che rispecchino coerentemente il reale comportamento delle precipitazioni.

Numerosi studi in campo meteorologico hanno appurato tuttavia che in Lombardia esiste un gradiente positivo di piovosità procedendo grosso modo da sud-est verso nord-ovest e tutto ciò potrebbe sembrare in contraddizione con quanto evidenziato dai dati sperimentali, che riportano maggiori valori di precipitazione alle località poste nella zona sud-orientale del territorio in esame. In realtà tale contraddizione non sussiste, in quanto i dati di base da cui si è partiti rappresentano i massimi annuali di pioggia riferiti a durate prestabilite, mentre i gradienti di piovosità si riferiscono alla quantità d'acqua cumulata che scende durante un intero anno a prescindere dal tasso di pioggia. In altri termini al gradiente di piovosità importa quanto piove complessivamente in un anno su una data località e ai suoi fini risulta ininfluente l'entità del singolo evento più intenso. Infatti considerando le precipitazioni cumulate annuali in tab. 11 reperite dagli annali si osserva che l'andamento del gradiente viene grosso modo rispettato, tolta la stazione di Bozzolo che presenta un valore anomalo. Infatti subito dopo scopriamo Treviglio, che non a caso tra tutte le stazioni in esame è quella collocata più a nordovest. Dopodiché ritroviamo più o meno alla stessa latitudine Lodi, Fontanella, Crema, Genivolta ed Orzinuovi. E tra queste a parità di latitudine proprio Lodi, situata più ad ovest, ha la media più alta. Le altre quattro località, molto vicine tra di loro sul territorio, hanno le medie delle cumulate annuali poste in ordine una di seguito all'altra.

stazione	media (mm/anno)
Bozzolo	904
Treviglio	878
Lodi	835
Fontanella	832
Genivolta	825
Crema	812
Orzinuovi	811
Codogno	798
Cremona	763
Pieve San Giacomo	754
Casalmaggiore	750
S. Matteo	708

Tab. 11: medie delle piogge cumulate annue, disposte in ordine crescente

E così via l'ordine decrescente delle stazioni viene mantenuto man mano che si scende idealmente verso la parte sud-orientale della provincia.

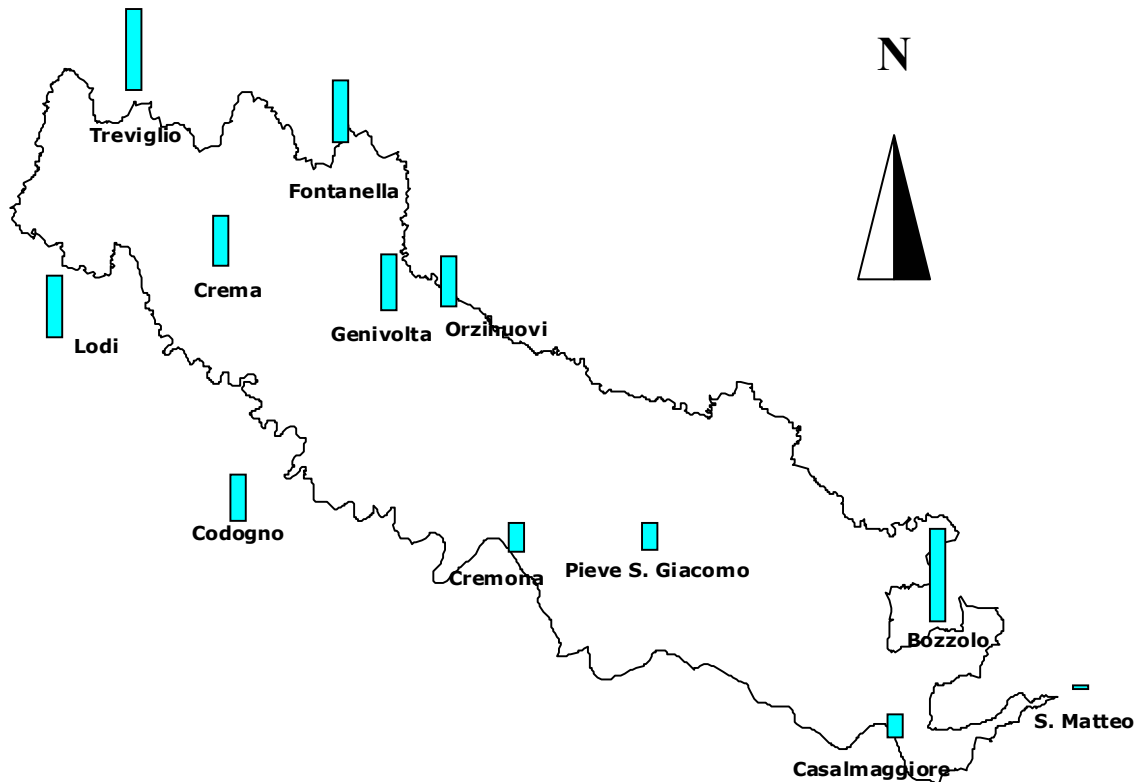


Fig. 24: per ogni stazione dislocata sul territorio corrisponde un istogramma indicante la pioggia cumulata su scala annuale

In particolare spiccano in coda alla lista proprio S. Matteo, Casalmaggiore e Pieve S. Giacomo, che in quest'ambito sono a fine classifica e che non a caso sono i paesi posti più a sud-est. Un altro aspetto comunemente noto in climatologia è che le piogge cumulate annuali crescono di norma all'aumentare dell'altitudine. Ed anche questo andamento è confermato come riportato in tab. 12 e nel diagramma in fig. 25, dove si apprezza che le località poste più in quota sono quelle col maggior quantitativo d'acqua precipitato durante l'anno. Tuttavia permane sempre l'eccezione di Bozzolo.

Stazione	quota (m s.l.m.)	media delle piogge cumulate annue (mm)
S. Matteo	19	708
Casalmaggiore	25	750
Bozzolo	33	904
Pieve S. Giacomo	39	754
Cremona	45	763
Codogno	58	798
Geninvolta	70	825
Crema	79	812
Lodi	80	835
Orzinuovi	88	811
Fontanella	105	832
Fontanella	105	832
Treviglio	126	878

Tab. 12: nella seconda colonna quote altimetriche delle stazioni sul livello del mare, nella terza colonna media delle piogge cumulate annue

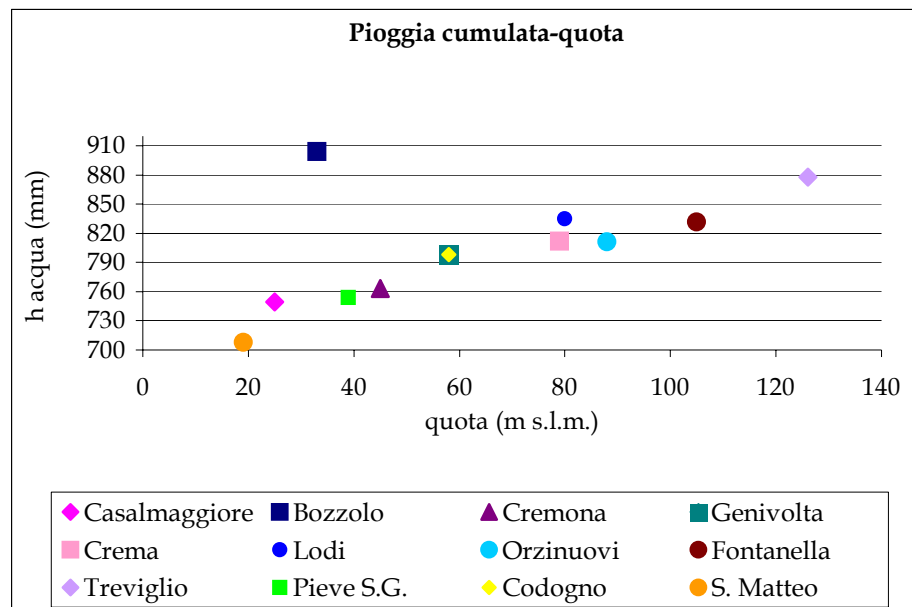


Fig. 25: In questo diagramma sono riportate le medie delle precipitazioni cumulate annue (sulle ordinate) in funzione della quota altimetrica (sulle ascisse)

Diagrammando invece i coefficienti pluviometrici orari delle località sulle rispettive quote altimetriche (fig. 26), che per giunta crescono andando verso nord-ovest come il gradiente di piovosità, non si scorge più un trend o comunque una qualche legge di variazione ben definita diversamente da quanto visto in fig. 25.

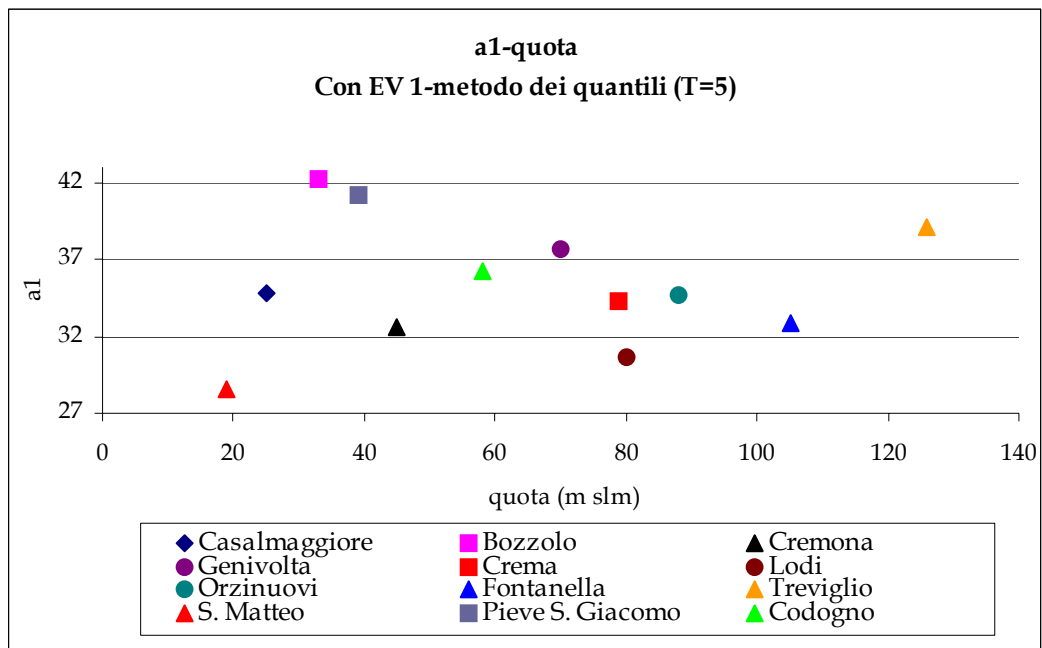


Fig. 26: sulle ordinate il coefficiente pluviometrico orario (mm/oren) per T=5 anni e sull'asse delle ascisse la quota sul livello del mare

Ciò accade perché per l'appunto i coefficienti pluviometrici orari provengono da singole osservazioni annuali di eventi intensi.

Analogamente dunque si ripete lo stesso scenario diagrammando sempre gli a1 in funzione della distanza da un punto assunto come origine. In fig. 27 i coefficienti pluviometrici sono stati graficati in funzione della distanza delle stazioni computate rispetto a S. Matteo.

stazione	distanza km	a ₁ mm/oren ⁿ
S. Matteo	0,0	28,62
Bozzolo	15,6	42,19
Casalmaggiore	16,5	34,78
Pieve S. Giacomo	39,8	41,24
Cremona	50,7	32,56
Orzinuovi	64,6	34,66
Geninvolta	69,6	37,62
Codogno	74,5	36,18
Fontanella	80,9	32,81
Crema	83,6	34,22
Lodi	94,6	30,67
Treviglio	98,8	39,1

Tab. 13. sulla prima colonna la distanza delle stazioni rispetto a S. Matteo presa come origine; sulla seconda colonna i coefficienti pluviometrici orari per T= 5 anni

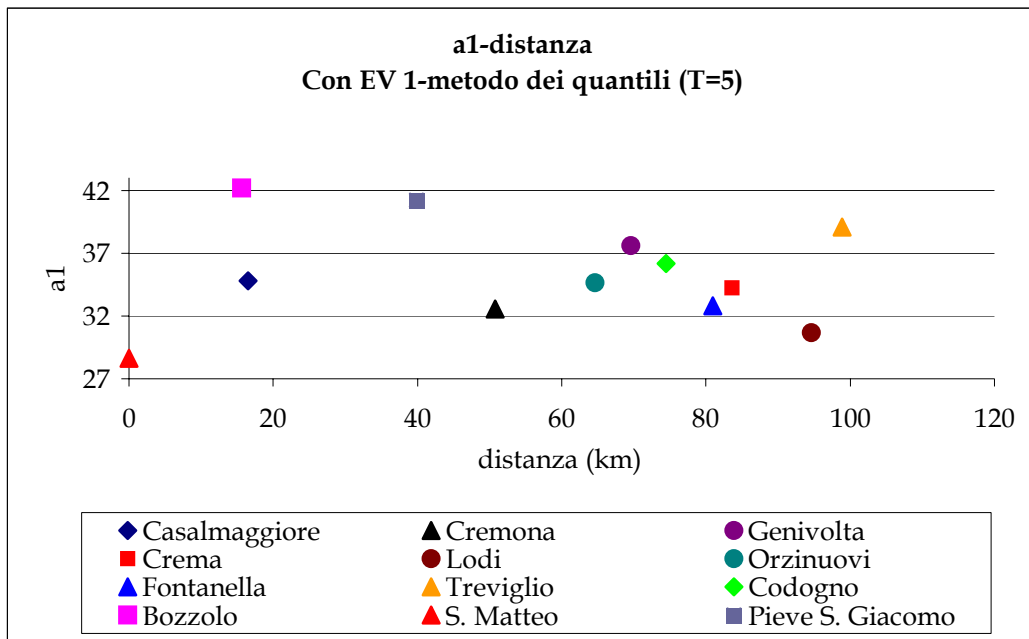


Fig. 27: : sulle ordinate il coefficiente pluviometrico orario (mm/oreⁿ) per T=5 anni e sull'asse delle ascisse la distanza in km delle stazioni prendendo come punto di origine S. Matteo.

Tale località è stata scelta come origine, perché è quella collocata più a sud-est. Come si può notare, non viene rispettato la direzione del gradiente, né alcun trend.

Infine, ritornando alla disamina delle curve di possibilità climatica, si osservi che l'andamento dei grafici non è assolutamente anomalo, ma che è quello tipico di tali funzioni, caratterizzato cioè da un progressivo appiattimento della curva man mano che

ci si sposta sull'asse delle ascisse, ovvero con una derivata seconda $\frac{\partial^2 h}{\partial d^2} < 0$. Quanto detto trova la sua spiegazione col fatto che in natura all'aumentare della durata di un evento meteorico il tasso di precipitazione $\frac{\partial h}{\partial d}$ è progressivamente decrescente.

4.3.2 Metodo vincolato

Per quanto concerne il metodo vincolato valgono le stesse considerazioni fatte nel par. 4.3.1.

In tab. 14 si segnala che l'esponente di scala varia in un range molto ristretto da 0,24 a 0,29. Abbastanza simili fra loro sono pure i coefficienti pluviometrici orari tra cui si segnalano ancora una volta i valori maggiori di Pieve S. Giacomo e Bozzolo.

stazione	n	a (5)	a (10)	a (25)	a (50)
Bozzolo	0,25	40,71	48,37	58,05	65,23
Casalmaggiore	0,26	35,58	42,08	50,30	56,39
Codogno	0,26	35,75	41,97	49,83	55,66
Crema	0,24	34,06	39,15	45,57	50,34
Cremona	0,29	32,64	39,05	47,14	53,15
Fontanella	0,27	32,12	37,04	43,26	47,87
Genivolta	0,24	37,11	43,63	51,86	57,97
Lodi	0,25	31,53	36,61	43,02	47,78
Orzinuovi	0,25	32,96	38,04	44,45	49,21
Pieve S.G.	0,25	40,19	48,81	59,71	67,79
S. Matteo	0,30	27,93	32,29	37,82	41,91
Treviglio	0,25	37,47	44,28	52,90	59,29

Tab. 14: parametri caratteristici delle curve di possibilità pluviometriche con la distribuzione di Gumbel (metodo vincolato)

Nelle figg. 28, 29, 30, 31 sono illustrati i diagrammi delle curve di possibilità climatica per i diversi tempi di ritorno. Anche in questo caso si scopre sostanzialmente lo stesso scenario visto con i quantili regolarizzati. Dunque ancora una volta Bozzolo e Pieve S.G. hanno le curve più alte, mentre Lodi ed Orzinuovi e S. Matteo le più basse.

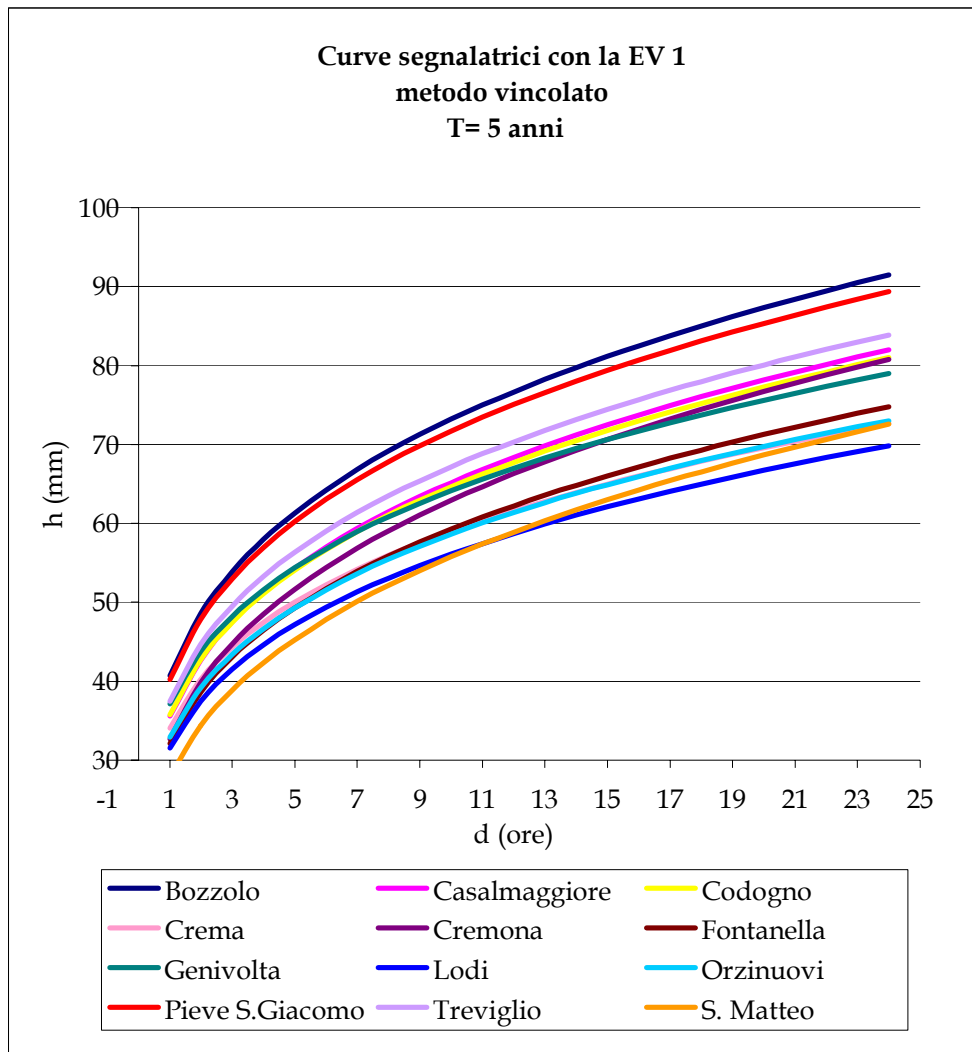


Fig. 28: curve segnalatrici ricavate con la distribuzione di Gumbel (metodo vincolato), riferite ad un tempo di ritorno di cinque anni

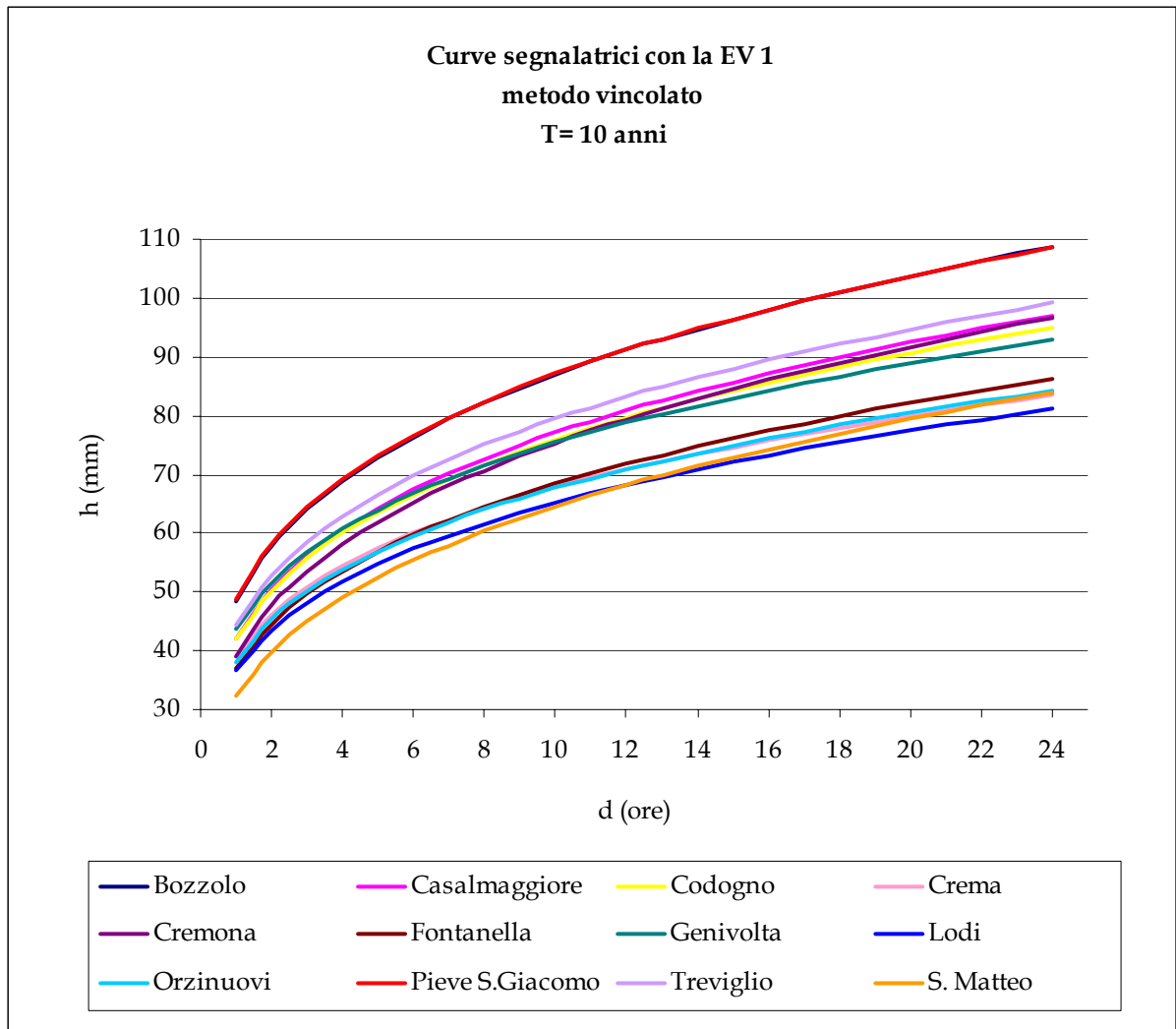


Fig. 29: curve segnalatrici ricavate con la distribuzione di Gumbel, (metodo vincolato), riferite ad un tempo di ritorno di dieci anni

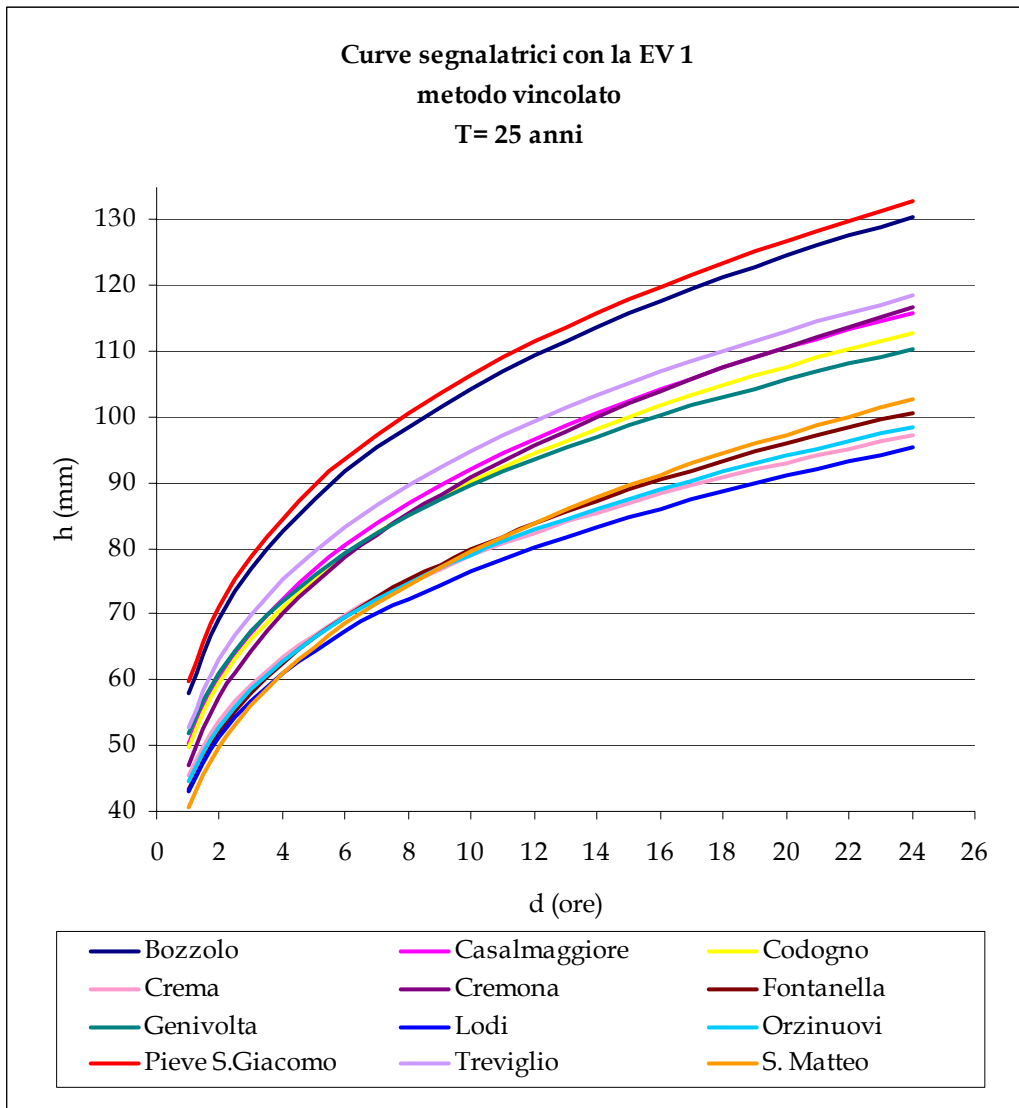


Fig. 30: curve segnalatrici ricavate con la distribuzione di Gumbel (metodo vincolato), riferite ad un tempo di ritorno di venticinque anni

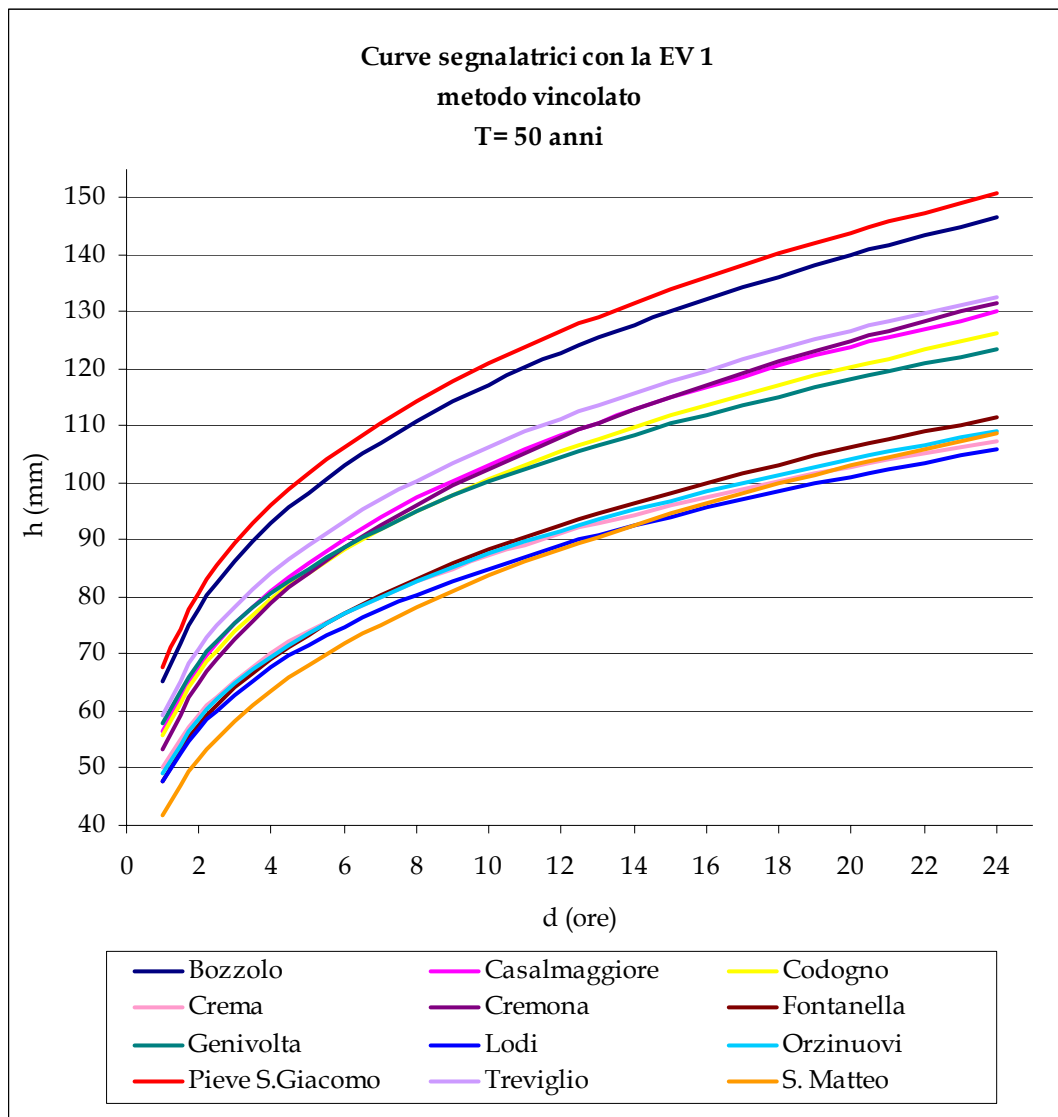


Fig. 31: curve segnalatrici ricavate con la distribuzione di Gumbel (metodo vincolato), riferite ad un tempo di ritorno di cinquant'anni

In terzo luogo si osserva che le fasce in cui sono contenute le curve stimate coi metodi dei quantili regolarizzati e vincolato hanno le ampiezze grosso modo uguali in tutti i tempi di ritorno; in particolare nella tab. 15 si riportano i valori minimi e massimi in cui sono collocati tali grafici. Tenuto conto di una leggera sottostima dei valori ottenuti col metodo dei quantili, possiamo dire che vi sia una sostanziale corrispondenza delle altezze di pioggia ricavate con i due metodi e ciò dà prova di una congruenza dei risultati ottenuti al di là del metodica utilizzata.

tempo di ritorno (anni)	fascia delle altezze d'acqua (mm)	
	met. quantili	met. vincolato
5	31-88	32-89
10	35-104	37-108
25	40-126	43-132
50	45-143	151-47

Tab. 15: range di variabilità (in termini di altezze di pioggia) delle curve segnalatrici ricavate con la EV1 col metodo dei quantili nella prima colonna e col metodo vincolato nella seconda colonna

4.4 GLI ESITI CON LA GEV

Analogamente a quanto fatto con la distribuzione di Gumbel, si è seguito uno stesso approccio per l'impiego della GEV e per lo studio dei risultati ottenuti. Perciò una volta stimati i parametri caratteristici della distribuzione, sono stati subito effettuati i test di Kolmogorov, in quanto, prima di procedere con una qualsiasi altra considerazione, è necessario assicurarsi del buon adattamento di tale distribuzione rispetto alle osservazioni sperimentali. A tal proposito la tab. 16 riporta gli esiti del test.

Stazione	max [abs (D)]	D _{critico}	esito
Bozzolo	0,044	0,111	OK !
Casalmaggiore	0,068	0,122	OK !
Cotogno	0,040	0,104	OK !
Crema	0,031	0,097	OK !
Cremona	0,027	0,080	OK !
Fontanella	0,039	0,113	OK !
Genivolta	0,037	0,090	OK !
Lodi	0,042	0,124	OK !
Orzinuovi	0,065	0,114	OK !
Pieve S. Giacomo	0,215	0,104	NO !
Treviglio	0,064	0,093	OK !

Tab. 16: esiti del test di Kolmogorov per la distribuzione GEV

I risultati di tali verifiche mostrano che la distribuzione generalizzata dei valori estremi fornisce un buon adattamento per tutte le serie storiche eccettuata quella di Pieve San Giacomo. In un certo senso tale esito era già stato supposto durante la stima dei parametri caratteristici, in quanto il parametro di forma risultava per la prima stazione uguale a $-0,378$, un valore del tutto anomalo se paragonato con quello delle altre località (vedi tabb. 17 e 18).

stazioni	k	α	u	a	n
Bozzolo	-0,074	0,293	0,808	31,3	0,255
Casalmaggiore	-0,144	0,247	0,817	27,6	0,263
Cotogno	-0,143	0,242	0,821	28,1	0,257
Crema	-0,071	0,221	0,856	27,8	0,238
Cremona	-0,133	0,273	0,801	24,8	0,285
Fontanella	0,101	0,281	0,863	26,1	0,266
Genivolta	-0,056	0,285	0,82	29,1	0,238
Lodi	-0,109	0,237	0,835	25,3	0,250
Orzinuovi	0,030	0,261	0,857	26,7	0,250
Treviglio	-0,047	0,286	0,821	29,1	0,254

Tab. 17: parametri caratteristici delle curve di possibilità pluviometriche con la GEV

	k	α	u	a	n
Pieve S. G.	-0,378	0,160	0,813	29,6	0,251

Tab. 18: parametri caratteristici delle curve di possibilità pluviometriche con la GEV per la sola stazione di Pieve S. Giacomo

Inoltre nel caso di Pieve S. Giacomo lo stesso foglio elettronico, una volta fornita la stima del parametro di forma in seguito alle iterazioni di cui al par.3.3, già avvertiva che esse non erano ottimali. Il test di Kolmogorov è dunque una conferma formale di quanto presagito. In forza di ciò per Pieve San Giacomo è adattabile solamente la distribuzione di Gumbel. Nel caso di S. Matteo il test non è stato nemmeno effettuabile, in quanto il parametro di forma k stimato a $-1,346$, ha posto il segno negativo all'argomento $(1+k)$ della funzione gamma di cui al par. 3.3, che richiedeva valori strettamente positivi; di conseguenza non si sono potuti stimare in cascata i parametri mancanti e ciò ha escluso a priori l'uso della GEV.

Al di là di questi due casi per tutte le altre stazioni i parametri variano in un intervallo abbastanza ristretto a riprova dell'omogeneità meteo-climatica delle serie discussa nel par. 4.2.

Nelle figg. 32, 33, 34 e 35 sono riportati i grafici delle curve segnalatrici per i consueti tempi di ritorno.

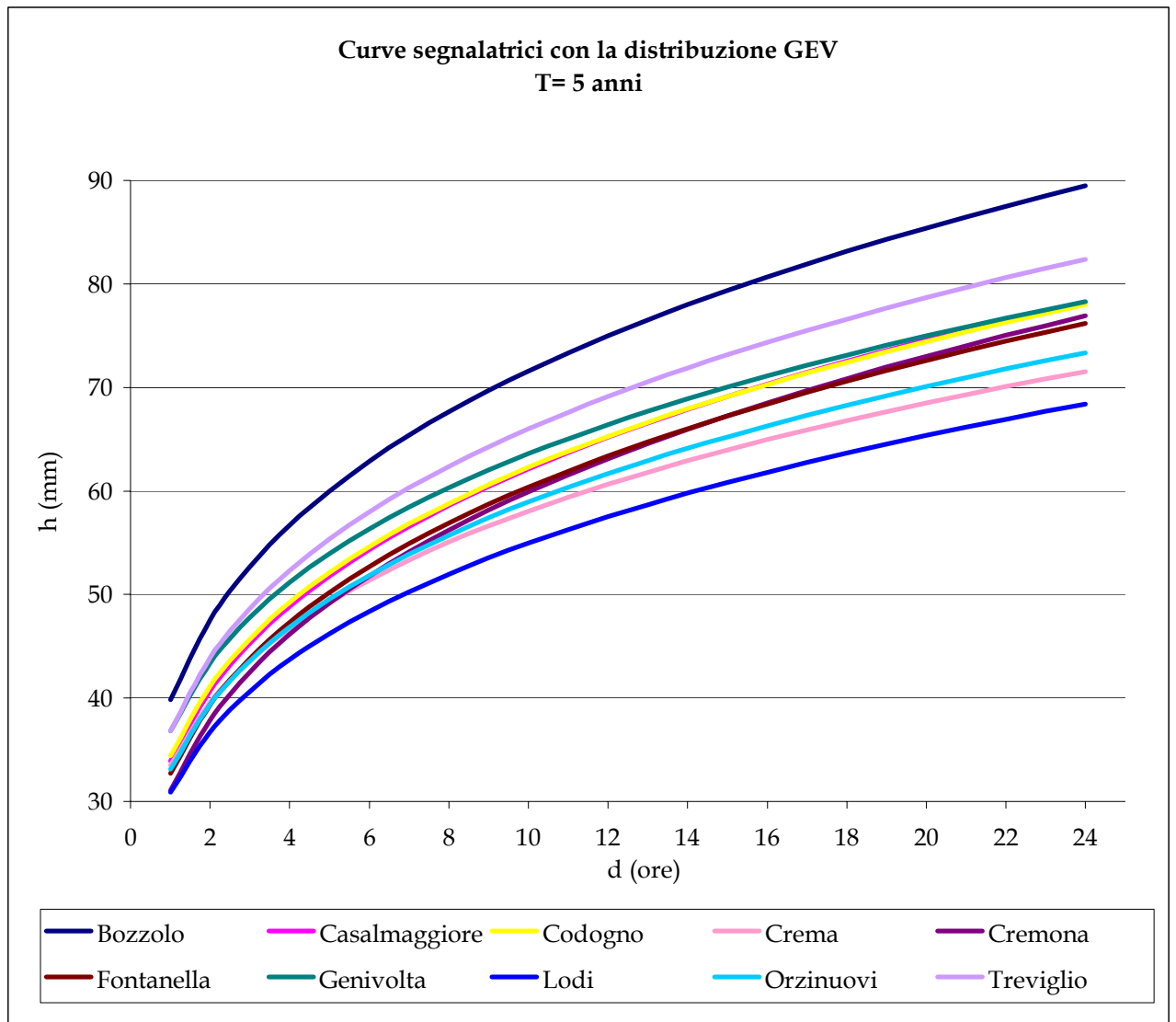


Fig. 32: curve segnalatrici ricavate con la GEV, riferite ad un tempo di ritorno di cinque anni

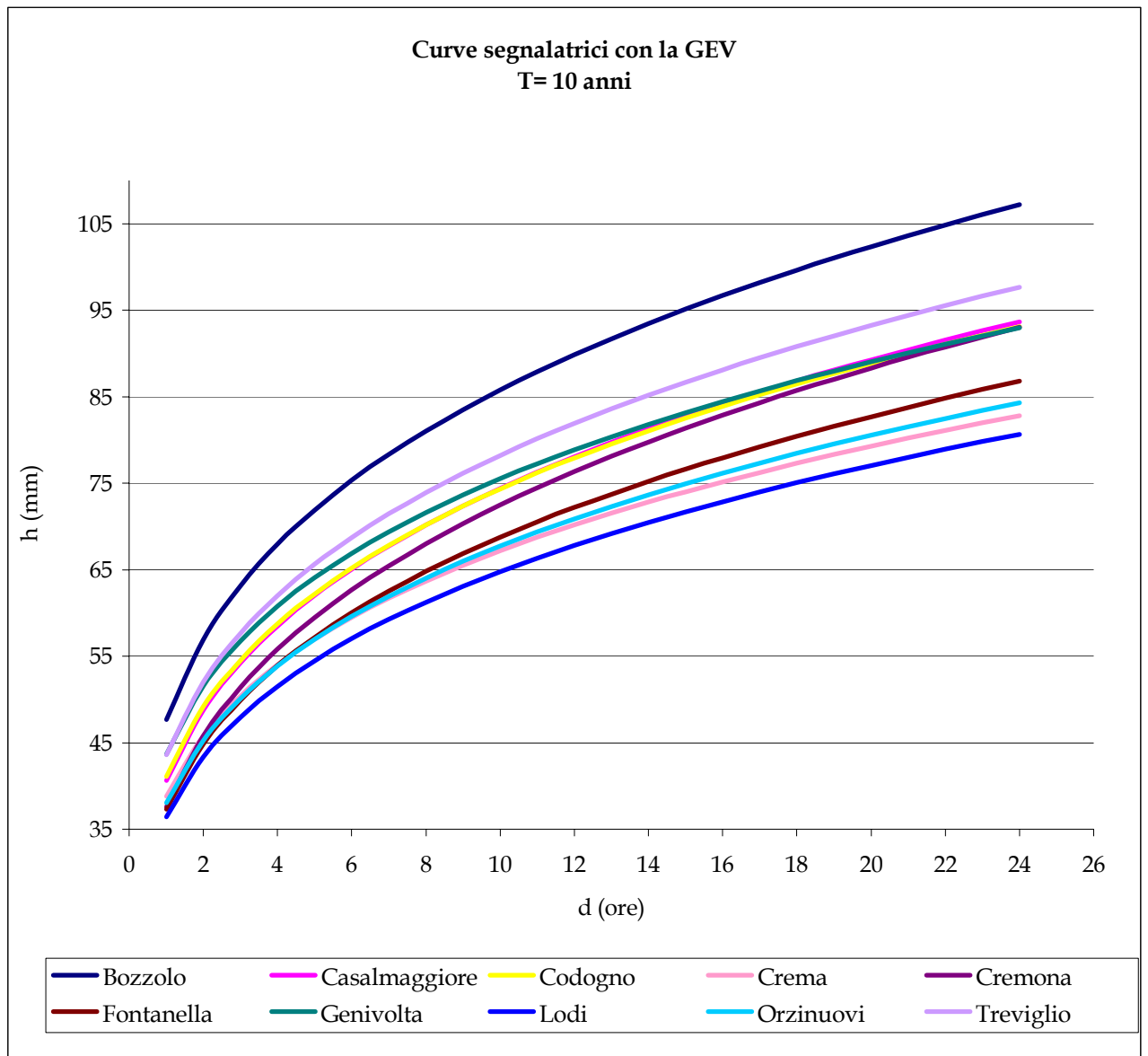


Fig. 33: curve segnalatrici ricavate con la GEV, riferite ad un tempo di ritorno di dieci anni

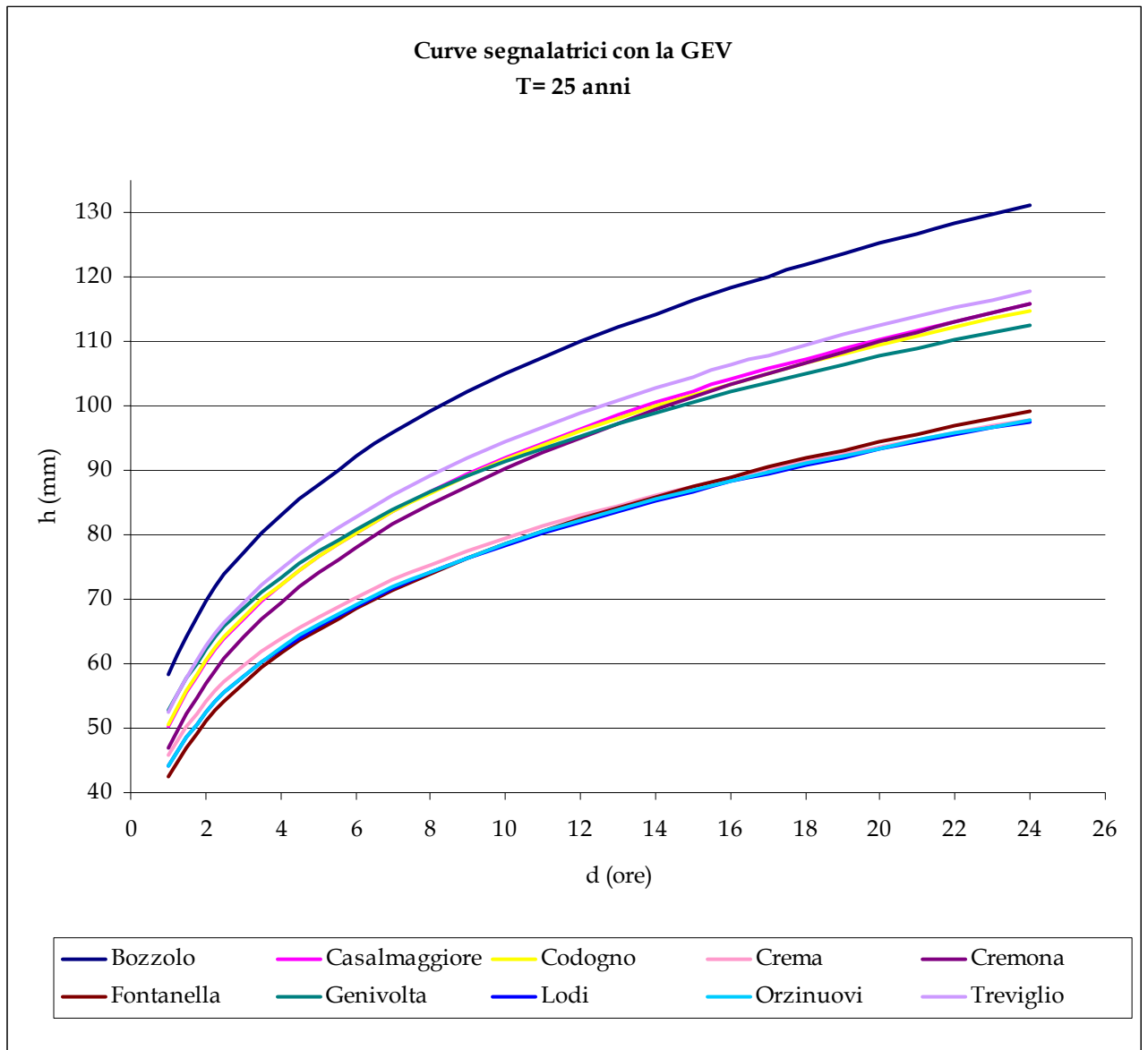


Fig. 34: curve segnalatrici ricavate con la GEV, riferite ad un tempo di ritorno di venticinque anni

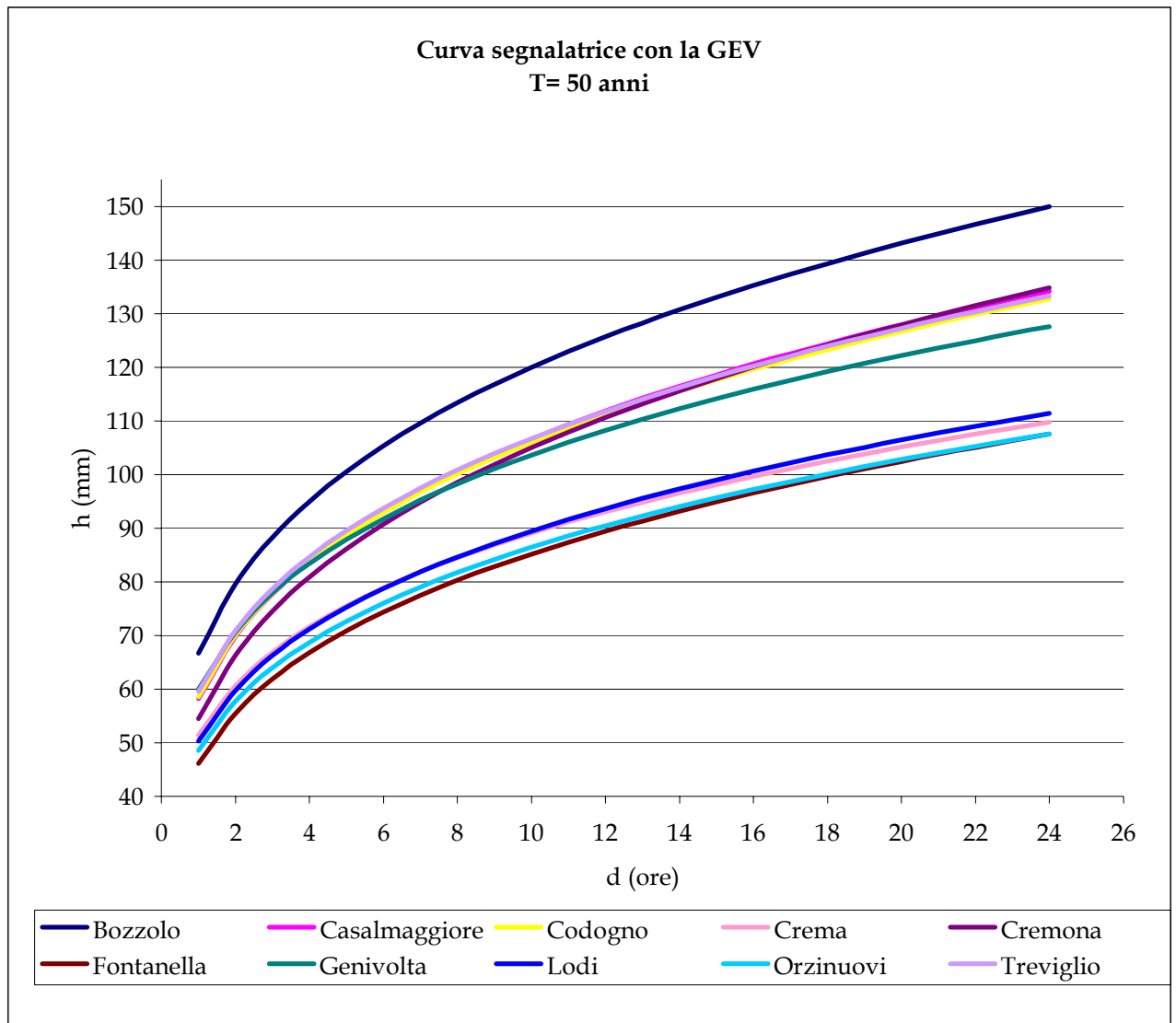


Fig. 35: curve segnalatrici ricavate con la GEV, riferite ad un tempo di ritorno di cinquant'anni

Anche in questo caso possiamo ricalcare le analoghe osservazioni fatte nel precedente paragrafo; in particolare si sottolinea che:

- Le funzioni presentano il tipico andamento delle curve segnalatrici con un progressivo appiattimento all'aumentare della durata, in quanto il tasso di pioggia decresce nel tempo.
- Le stazioni con le precipitazioni massime annuali più elevate hanno le curve più alte nel piano cartesiano, in concordanza con i dati sperimentali e sotto questo punto di vista Bozzolo si riconferma ancora una volta la stazione con la curva più alta seguita da Treviglio, mentre Orzinuovi, Lodi ed anche Crema sono le stazioni con la curva più bassa. Ovviamente Pieve S. Giacomo e S. Matteo non sono state considerate, perché hanno rigettato la GEV come distribuzione asintotica dei massimi valori.

A questo punto, come fatto nel par. 4.3.1, si è provato a diagrammare (per T = 5 anni) il coefficiente pluviometrico "aggregato" a pari in questo caso a

$$a = a_1 \left[u + \frac{\alpha}{k} (1 - e^{-ky}) \right] \quad (54)$$

rispetto alla quota (fig. 36) e poi rispetto alle distanza (fig. 37) prendendo in questo caso come riferimento la stazione di Casalmaggiore.

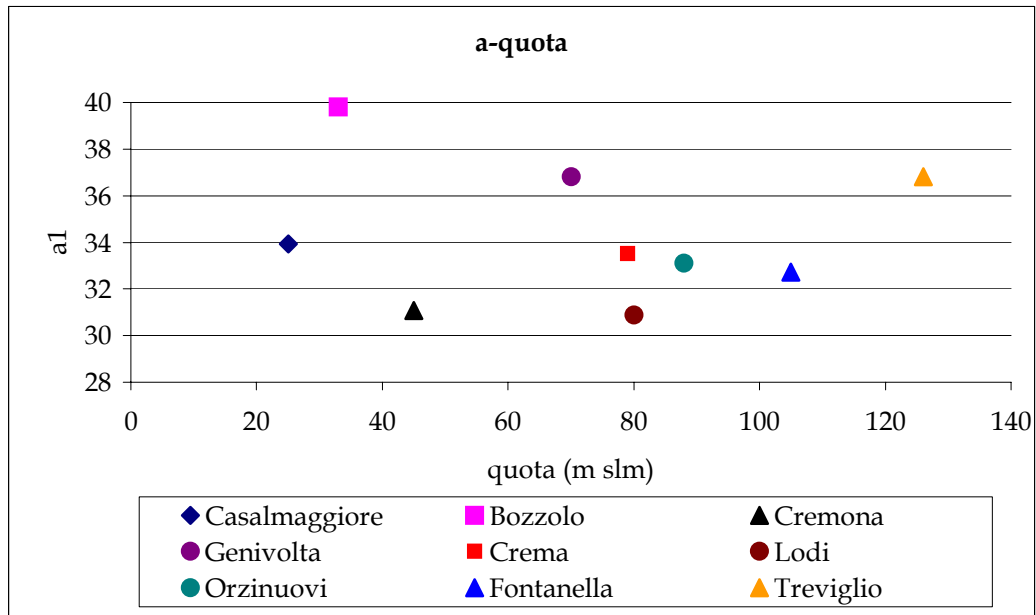


Fig. 36: sulle ordinate il coefficiente pluviometrico orario (mm/oreⁿ) per T=5 anni e sull'asse delle ascisse la quota sul livello del mare

stazione	distanza km	a ₁ mm/ore ⁿ
Casalmaggiore	0	33,94
Bozzolo	13,2	39,82
Cremona	37,0	31,07
Orzinuovi	54,3	33,12
Geninvolta	58,3	36,80
Codogno	60,2	34,44
Fontanella	71,5	32,72
Crema	71,7	33,53
Lodi	81,0	30,89
Treviglio	87,9	36,81

Tab. 19. sulla prima colonna la distanza delle stazioni da Casalmaggiore, presa come origine; sulla seconda colonna i coefficienti pluviometrici orari per T= 5 anni

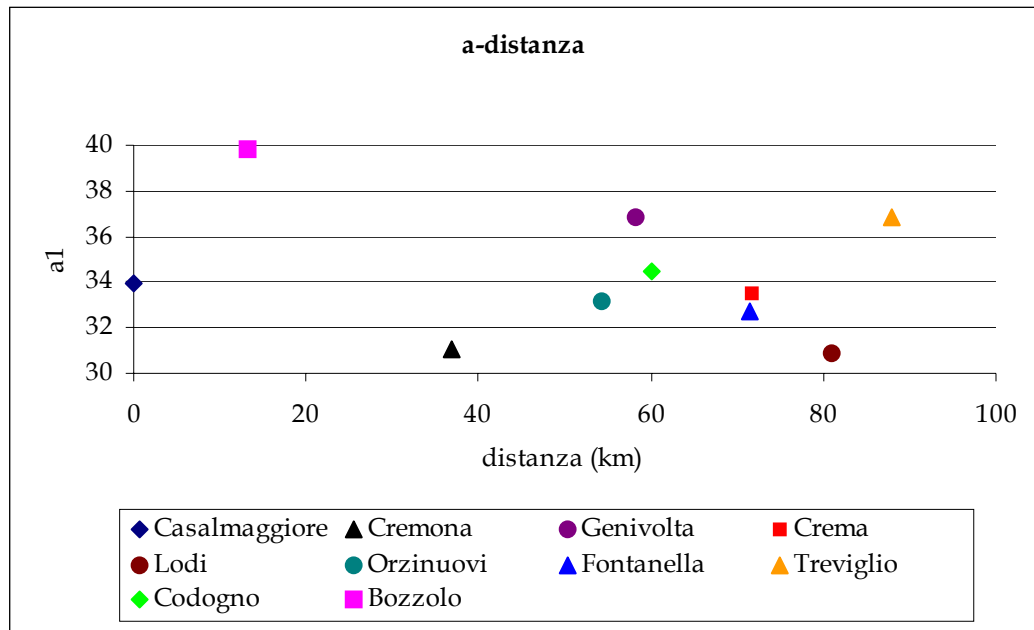


Fig. 37: sulle ordinate il coefficiente pluviometrico orario (mm/ore^n) per $T=5$ anni e sull'asse delle ascisse la distanza in km delle stazioni prendendo come punto di origine Casalmaggiore

Anche in questo caso non si scorge alcun trend solidale col gradiente di piovosità, in quanto a è un parametro ricavato a meno di stime da singole osservazioni annuali, mentre il gradiente proviene dal cumulo delle precipitazioni su base annuale.

4.5 CONFRONTO TRA LE DISTRIBUZIONI EV 1, GEV ED IL RAPPORTO VAPI

In questo paragrafo si desidera confrontare le stime dei parametri ottenuti nel presente lavoro con quelli ricavati dal rapporto VAPI. In secondo luogo si vuole mettere a paragone le curve segnalatrici stimate con la distribuzione GEV rispetto a quella di Gumbel. Nel caso della EV 1, dal momento che gli approcci dei quantili regolarizzati e vincolato hanno prodotto risultati simili, si opererà il raffronto solo col metodo vincolato.

Si osservi ora il prospetto riassuntivo in tab. 20. Sotto la voce tesi sono riportati i parametri della GEV stimati nel presente lavoro, mentre sotto la voce VAPI i medesimi valori calcolati nell'ambito dell'omonimo rapporto. Si può notare che i valori sono sostanzialmente simili. Le lievi differenze sono dovute in certi casi al maggior numero di anni reperiti nella tesi.

Bozzolo	tesi	VAPI
k	-0,074	-0,060
α	0,293	0,292
ε	0,808	0,813
a	31,3	31,3
n	0,255	0,255

Casalmaggiore	tesi	VAPI
k	-0,144	-0,053
α	0,247	0,232
ε	0,817	0,853
a	27,6	25,2
n	0,263	0,269

Codogno	tesi	VAPI
k	-0,143	-0,131
α	0,242	0,241
ε	0,821	0,825
a	28,1	28,1
n	0,257	0,257

Crema	tesi	VAPI
k	-0,071	-0,061
α	0,221	0,219
ε	0,856	0,859
a	27,8	27,8
n	0,238	0,238

Cremona	tesi	VAPI
k	-0,133	-0,134
α	0,273	0,274
ε	0,801	0,800
a	24,8	24,9
n	0,285	0,266

Fontanella	tesi	VAPI
k	0,101	0,108
α	0,281	0,288
ε	0,863	0,862
a	26,1	26,0
n	0,266	0,261

Genivolta	tesi	VAPI
k	-0,056	-0,087
α	0,285	0,283
ε	0,82	0,81
a	29,1	30,6
n	0,238	0,218

Lodi	tesi	VAPI
k	-0,109	-0,087
α	0,237	0,235
ε	0,835	0,842
a	25,3	25,7
n	0,250	0,247

Orzinuovi	tesi	VAPI
k	0,030	0,043
α	0,261	0,258
ε	0,857	0,862
a	26,7	26,7
n	0,250	0,250

Treviglio	tesi	VAPI
k	-0,047	-0,037
α	0,286	0,285
ε	0,821	0,825
a	29,1	29,1
n	0,254	0,254

Tab. 20: confronto tra i parametri caratteristici della GEV stimati nel presente lavoro e quelli stimati dal VAPI.

A riprova di quanto detto si osservino come esempio i grafici nelle fig. 38, 39, 40, 41, 42 e 43 riferite alla stazione di Genivolta; in verde abbiamo la curva segnalatrice GEV ottenuta con i parametri stimati nel presente lavoro, mentre in fucsia è riportata la curva di possibilità pluviometrica stimata dal VAPI. Si evince senza dubbio che le due curve siano coincidenti per T uguale a cinque e a dieci anni; al massimo si apprezza un lieve scostamento nei tempi di ritorno di venticinque e cinquant'anni. Dunque se si incrementa T si può notare che lo scostamento diventa sempre più sensibile come evidenziato in fig.

43 dove il tempo di ritorno è di mille anni. Da ciò si può desumere che per tempi di ritorno piccoli le differenze non sono sensibili, ma per orizzonti temporali più lunghi i ventitre anni in più di Genivolta fanno apprezzare un divario.

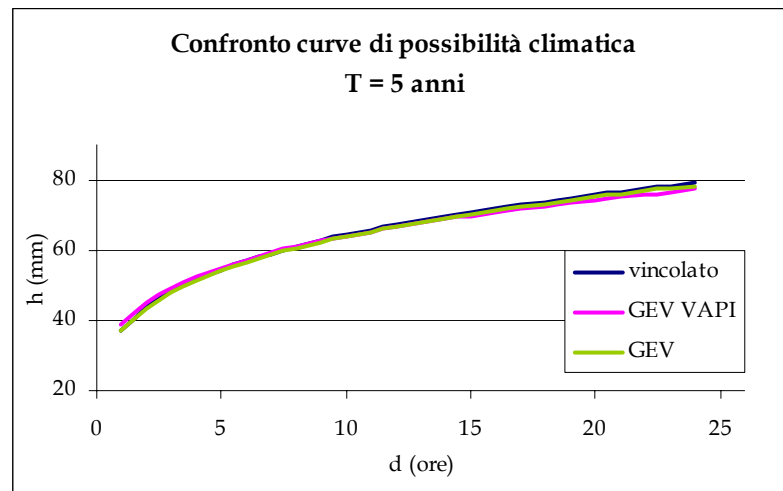


Fig. 38: per la serie storica di Genivolta sono riportate a confronto le curve segnalatrici (per tempo di ritorno quinquennale) ricavate nel presente lavoro con la GEV (in verde), con la EV 1-metodo vincolato (in blu) e con la GEV elaborata nel rapporto VAPI (in fucsia).

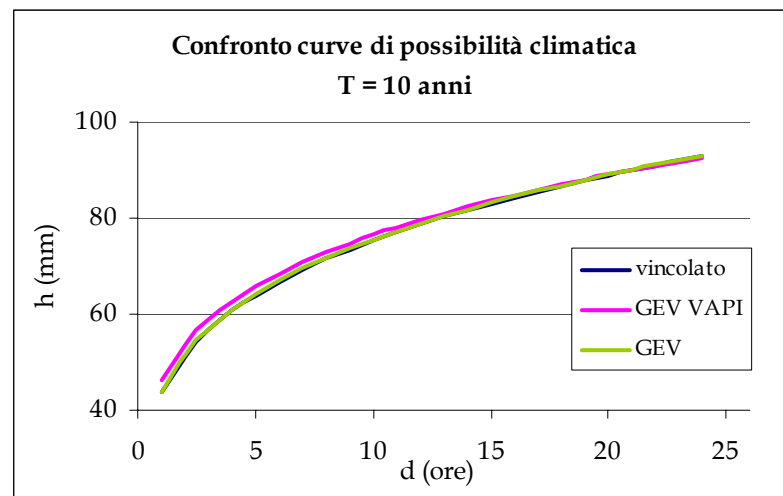


Fig. 39: per la serie storica di Genivolta sono riportate a confronto le curve segnalatrici (per tempo di ritorno decennale) ricavate nel presente lavoro con la GEV (in verde), con la EV 1-metodo vincolato (in blu) e con la GEV elaborata nel rapporto VAPI (in fucsia).

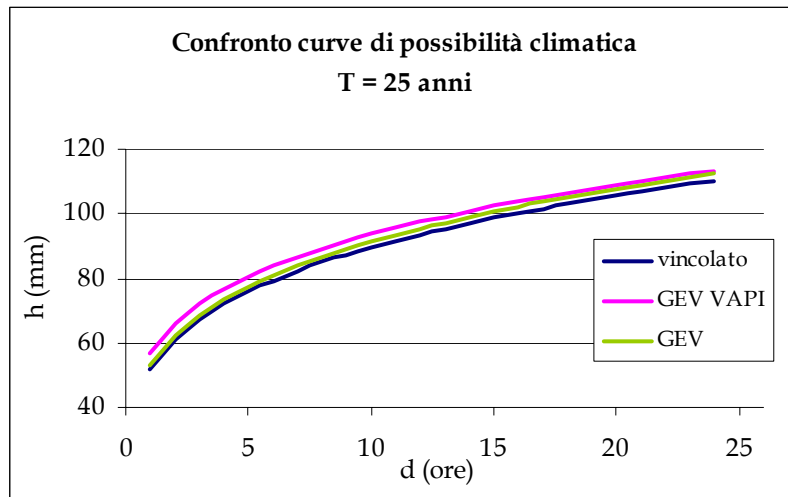


Fig. 40: per la serie storica di Genivolta sono riportate a confronto le curve segnalatrici (per tempo di ritorno di venticinque anni) ricavate nel presente lavoro con la GEV (in verde), con la EV 1-metodo vincolato (in blu) e con la GEV elaborata nel rapporto VAPI (in fucsia).

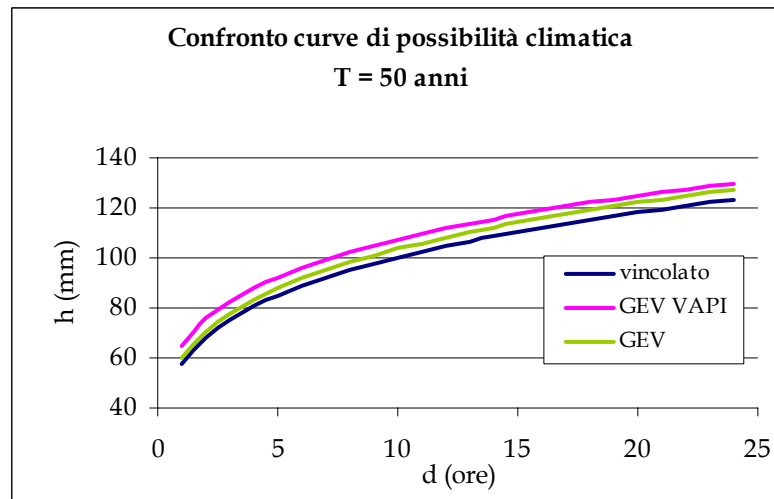


Fig. 41: per la serie storica di Genivolta sono riportate a confronto le curve segnalatrici (per tempo di ritorno di cinquant'anni) ricavate nel presente lavoro con la GEV (in verde), con la EV 1-metodo vincolato (in blu) e con la GEV elaborata nel rapporto VAPI (in fucsia).

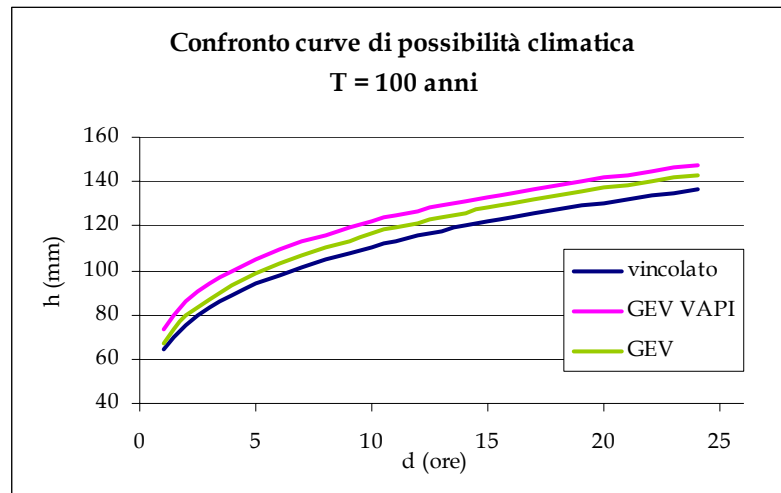


Fig. 42: per la serie storica di Genivolta sono riportate a confronto le curve segnalatrici (per tempo di ritorno di cent'anni) ricavate nel presente lavoro con la GEV (in verde), con la EV 1-metodo vincolato (in blu) e con la GEV elaborata nel rapporto VAPI (in fucsia)

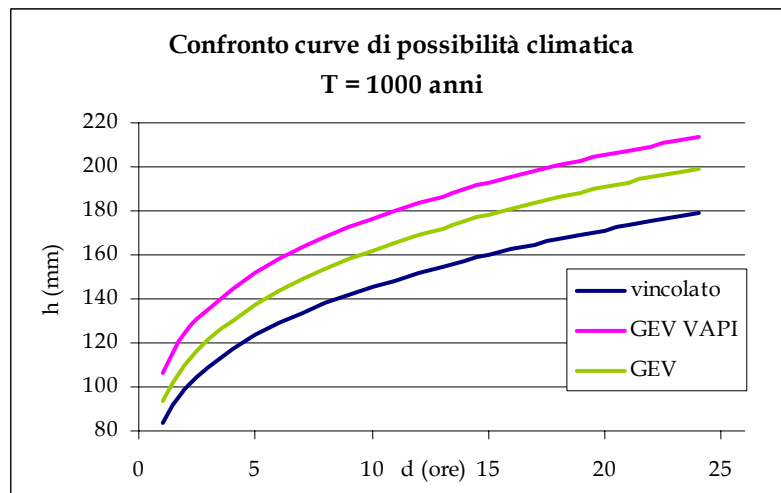


Fig. 43: per la serie storica di Genivolta sono riportate a confronto le curve segnalatrici (per tempo di ritorno di mille anni) ricavate nel presente lavoro con la GEV (in verde), con la EV 1-metodo vincolato (in blu) e con la GEV elaborata nel rapporto VAPI (in fucsia).

A questo punto sarebbe interessante operare in analogia col VAPI una regionalizzazione dei parametri stimati in modo tale che ad ogni punto del territorio sia associato il set di valori necessario per la curva di possibilità pluviometrica, per cui non più solo in corrispondenza delle stazioni pluviometriche. Tuttavia ciò non è possibile, in quanto, la regionalizzazione ha attendibilità solo se viene condotta su superfici di maggiori estensioni ad esempio su scala regionale od interregionale, come è stato fatto nel rapporto. Nel nostro caso però si sta analizzando un territorio a scala provinciale che di per sé è pure abbastanza piccolo, che non è certamente paragonabile a macro-zone dell'Italia nord-occidentale. In altri termini vi è un effetto nugget che impedisce di apprezzare sul territorio ristretto una legge di variabilità netta per un determinato

parametro, soprattutto se questo non è un dato misurato, ma frutto di elaborazioni (Ghezzi e De Michele). Del resto è anche palese l'esempio dei coefficienti pluviometrici orari di cui si è discusso nei parr. 4.3.1 e 4.4, dove si evidenzia l'impossibilità di intravedere una legge di variazione nello spazio.

Per quanto concerne la comparazione tra le curve segnalatrici stimate con la GEV e la EV 1, possiamo notare, sempre per il caso di Genivolta dalle figg. 38, 39, 40 e 41, che le due funzioni sono strettamente appaiate. Infatti la curva in blu ottenuta con la distribuzione di Gumbel si discosta al più di pochissimi millimetri di pioggia dalla GEV in verde, mentre per tempi di ritorno quinquennale e decennale sono addirittura coincidenti. Del resto tale risultato è già deducibile semplicemente dal valore di k in tab. 14. Ricollegandosi a quanto discusso nel par. 3.3, la distribuzione di Gumbel è un caso limite della distribuzione generalizzata ai valori estremi che si ottiene per nullo. Dal momento che proprio i parametri di forma sono prossimi a zero, è ovvio ipotizzare che le due curve siano molto prossime. Sotto questo aspetto quindi i grafici fatti a titolo di esempio per Genivolta hanno dato un'eloquente riconferma visiva.

Se le due curve per ciascuna stazione sono fortemente appaiate, ne consegue che anche l'ordine di disposizione delle curve segnalatrici per i vari tempi di ritorno sia grosso modo lo stesso, sia per la GEV che per la EV 1. Ad esempio come già osservato in ambo le distribuzioni Bozzolo e Treviglio si rivelano le stazioni caratterizzate da eventi meteorici più intensi, mentre Orzinuovi e Lodi sono le località con piogge massime meno intense. La congruenza di tali risultati può consentire dunque un'intercambiabilità delle due curve per futuri impieghi.

4.6 IL CASO DI BOZZOLO

Ogni distribuzione asintotica ai massimi valori applicata alle curve di possibilità pluviometrica ha evidenziato come Bozzolo e Pieve S. Giacomo (tralasciando per quest'ultima la GEV) siano le località soggette a eventi piovosi più intensi su scala annuale. Benché siano poste più a sud-est rispetto alle altre località, questo fatto tranne che per Bozzolo non è entrato in contraddizione col gradiente di piovosità, che in Lombardia li pone all'ultimo posto. Infatti analizzando la precipitazione cumulata di tutto l'anno, è stato confermato detto gradiente per tutte le stazioni inclusa Pieve S. Giacomo che in tale contesto è stata collocata in classifica al terzultimo posto, prima di Casalmaggiore e S. Matteo, le quali non a caso si trovano nella zona più sud-orientale del territorio in esame. Tuttavia per Bozzolo la contraddizione rimane, perché continua ad attestarsi anche sotto questo punto di vista la località più piovosa ed ovviamente tale anomalia ha spinto ad ulteriori indagini. In primo luogo è stata confrontata la curva di

possibilità pluviometrica con quella del VAPI ed ancora una volta c'è una convergenza dei risultati sperimentali (figg. 42, 43, 44 e 45).

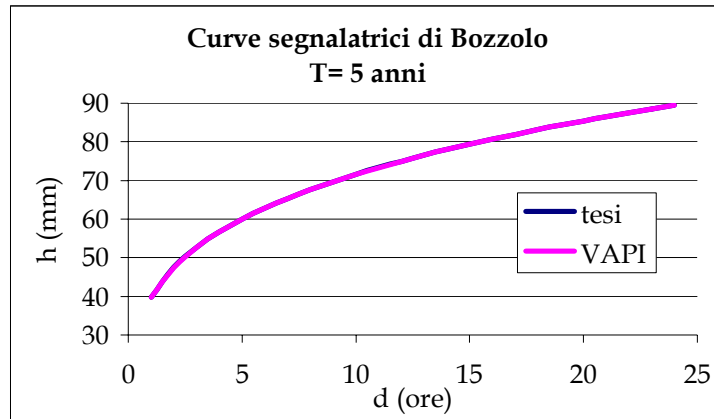


Fig. 42: Confronto delle curve segnalatrici elaborate dalla presente tesi e dal VAPI per la sola stazione di Bozzolo (T= 5 anni)

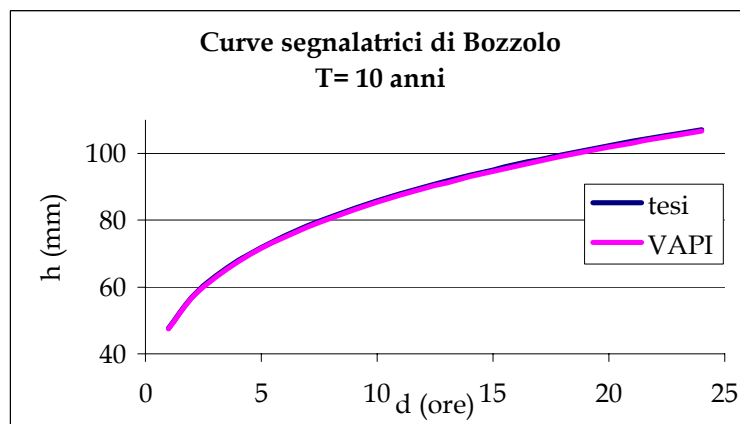


Fig. 43: Confronto delle curve segnalatrici elaborate dalla presente tesi e dal VAPI per la sola stazione di Bozzolo (T= 10 anni)

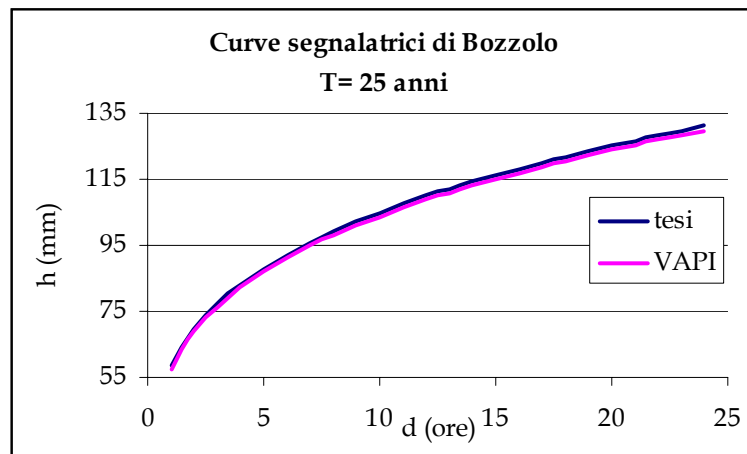


Fig. 44: Confronto delle curve segnalatrici elaborate dalla presente tesi e dal VAPI per la sola stazione di Bozzolo (T= 25 anni)

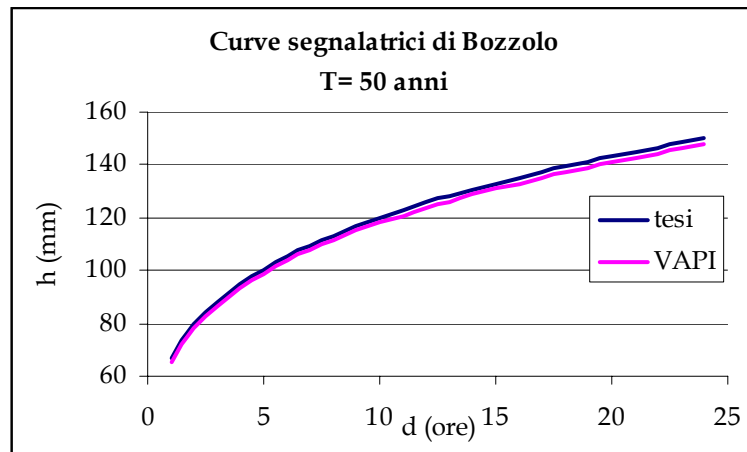


Fig. 45: Confronto delle curve segnalatrici elaborate dalla presente tesi e dal VAPI per la sola stazione di Bozzolo (T= 50 anni)

Quindi anche il VAPI è pervenuto agli stessi risultati e ciò escluderebbe un errore nelle elaborazioni da noi fatte per tale stazione.

Si potrebbe considerare l'eventuale esistenza di una zona micro-climatica differente in tale località, ma S. Matteo, che si trova nelle vicinanze, non ha presentato incongruenze nella piovosità su base annua. Per scrupolo si è pure analizzata la stazione Mantova collocata più a sud-est e che al contempo dispone di una significativa serie storica. Per essa è stata calcolata la media delle piogge cumulate annuali e dalla tab. 21 si evince che Mantova è, in conformità alle previsioni, più arida rispetto alle altre località.

Stazione	h (mm)
Bozzolo	904
Treviglio	878
Lodi	835
Fontanella	832
Genivolta	825
Crema	812
Orzinuovi	811
Cotogno	798
Cremona	763
Pieve S.G.	754
Casalmaggiore	750
S. Matteo	708
<i>Mantova</i>	<i>591</i>

Tab. 21: sulla seconda colonna media delle piovosità cumulate annue

In aggiunta è doveroso ricordare che si è chiesto presso l'ufficio idrografico dell'ARPA-Lombardia sulla collocazione precisa e sulle modalità di funzionamento del pluviografo di Bozzolo, apprendendo però che lo strumento in oggetto è stato dismesso e non è più operativo dal 1986. Da allora l'ufficio non ha più ricevuto alcun dato sulla località in questione ed ignote sono pure le sorti dello strumento. Dal momento che non esistono in zona altre stazioni significativamente vicine, sarebbe ovviamente interessante collocare diverse stazioni nel territorio in esame, per verificare l'entità delle precipitazioni annue. È vero però che un confronto significativo richiederebbe diversi anni di osservazioni.

Dal momento che in zona a livello pedo-paesaggistico non vi sono variazioni di quota significative e dal punto di vista idrografico non esistono invasi idrici tali da giustificare un microclima differente, c'è quanto meno il sospetto allo stato attuale delle cose di un mal funzionamento e/o di una inopportuna collocazione del pluviografo che ,è stato in servizio in tale zona.

CONCLUSIONI

Alla luce di tutte le elaborazioni svolte nel presente lavoro, sono stati conseguiti i seguenti risultati:

- I. Tramite la lettura manuale delle precipitazioni tracciate dal pluviografo in dotazione al Consorzio, sito in località Tombe Morte a Genivolta, è stata aggiornata per l'omonima stazione la serie storica delle massime altezze di pioggia annuali per le durate di 1, 3, 6, 12 e 24 h. Le vecchie osservazioni provenienti dagli annali idrologici, che coprivano il periodo dal 1955 al 1979, sono state così protrate fino al 2003, ottenendo un set di quarantasei anni di dati. Detta aggiunta si è dimostrata lecita, in quanto le precipitazioni degli anni più recenti mostravano medie e deviazioni standard simili alla popolazione campionaria originaria. Inoltre è emerso dalla lettura dei grafici che le precipitazioni di più lunga durata (12 e 24 h) ricadono per la quasi totalità dei casi a cavallo tra Ottobre e Novembre, in conformità al meteo-clima padano, che prevede il massimo di pioggia proprio nel periodo autunnale.
- II. La distribuzione di Gumbel, adottata come una delle leggi probabilistiche per la distribuzione delle precipitazioni, ha dimostrato un buon adattamento nell'interpretare l'andamento dei dati sperimentali, come ha confermato il test di Kolmogorov per tutte le dodici stazioni coinvolte. Per la stima dei parametri caratteristici delle curve segnalatrici si è fatto ricorso sia al vecchio metodo dei quantili regolarizzati, sia a quello più recente detto vincolato. I coefficienti pluviometrici orari ed ancor più gli esponenti di scala di tutte le località variano in un range ristretto a dimostrazione del fatto che le stazioni scelte per questo studio ricadono in una zona omogenea a livello meteo-climatico ed idrologico. Diagrammando le curve segnalatrici calcolate per tempi di ritorno di cinque, dieci, venticinque e cinquant'anni, si osserva il tipico andamento di queste funzioni, con una concavità rivolta verso il basso ed un'inclinazione progressivamente decrescente, in concordanza col fatto che in natura all'aumentare del tempo di un evento meteorico il tasso di precipitazione diminuisce. Sia nel metodo dei quantili, che in quello vincolato spiccano le curve di Bozzolo e Pieve S. Giacomo, che si attestano le località caratterizzate dagli eventi piovosi più intensi, mentre Orzinuovi, Lodi e S. Matteo sono grosso modo le stazioni con gli eventi meno intensi; quanto detto risulta in accordo con le medie delle osservazioni sperimentali che già indicavano Bozzolo e Pieve S. Giacomo le stazioni con le precipitazioni di maggior entità. Infine è emersa, a meno di una lieve sottostima col metodo dei quantili, l'analogia dei risultati col metodo vincolato.

- III. La GEV, la seconda legge di probabilità prescelta, ha mostrato in conformità alla EV 1 il buon adattamento con le osservazioni sperimentali in tutte le stazioni eccettuate quelle di Pieve S. Giacomo e S. Matteo, le cui serie storiche hanno dunque rigettato tale distribuzione. Nei casi leciti le curve di possibilità pluviometrica, che presentano il tipico andamento convesso, mantengono nel piano cartesiano sostanzialmente lo stesso ordine, ponendo Bozzolo come la località caratterizzata dalle precipitazioni più intense, mentre Orzinuovi assieme a Lodi è in coda. I parametri di forma di tutte le stazioni sono prossimi a zero; dal momento che la distribuzione di Gumbel è un caso limite della GEV per k nullo, è emersa l'intercambiabilità delle curve ottenute con questi due metodi, curve che si sono mostrate equivalenti. Infatti sul piano cartesiano si sono rivelate pressoché coincidenti.
- IV. La disposizione di tali curve in contrasto col gradiente positivo di piovosità cumulata annua disposto in Lombardia da SE a NW, ha evidenziato un'apparente discrepanza. Tuttavia la ricerca dei dati di pioggia cumulata annuale sugli annali idrologici ha confermato l'effettiva esistenza di detto gradiente, per tutte le stazioni, eccettuata quella di Bozzolo, che anche in questo ambito continua ad essere in modo anomalo la località più piovosa. Tralasciando tale eccezione di cui si parlerà al punto VI, si è giunti alla ragionevole constatazione che il gradiente di piovosità si basa su tutte le precipitazioni meteoriche occorse durante l'anno e che quindi non dipende certamente da un singolo evento piovoso, per quanto possa essere quello più intenso.
- V. I parametri della GEV stimati nel presente lavoro sono stati messi a confronto con quelli del rapporto VAPI del 2001. È stata evidenziata concordanza tra i risultati sperimentali. Tutto ciò dimostra la robustezza del VAPI ed è allo stesso tempo un avvallo alla validità delle elaborazioni effettuate in tale tesi. Il fatto è confermato anche per Genivolta, che si avvale nel nostro caso di ben ventitre anni di dati in più. La concordanza è forte per i tempi di ritorno più brevi (cinque, dieci e venticinque anni), dal momento che le curve sono coincidenti, mentre per orizzonti temporali più estesi (cinquanta, cento e mille anni) c'è un divario che si manifesta in maniera sensibile.
- VI. Sulla base di quanto detto al punto IV, l'anomalia di Bozzolo ha spinto ad ulteriori indagini sulla piovosità cumulata annua, indagini che hanno confermato l'incongruenza dei dati reperiti dagli annali rispetto al gradiente di piovosità della Lombardia. Visto che tuttavia il pluviografo in questione è stato dismesso nel 1986 e da allora ignota è la sua sorte, sarebbe interessante collocare altri dispositivi in zona per appurare l'effettiva esistenza di una zona micro-climatica diversa, malgrado a livello ambientale non vi siano indizi in tal senso. Al momento quindi c'è quantomeno il legittimo sospetto di un mal funzionamento del pluviografo che è stato in passato utilizzato per questa stazione.

In conclusione possiamo evidenziare che il lavoro svolto ha consentito di creare delle curve di possibilità pluviometriche aggiornate soprattutto per Genivolta, curve che potranno essere impiegate dal Consorzio o da qualche altro ente operante sul territorio cremonese per un dimensionamento ragionato sulle opere idrauliche, che non si risolva più con un eccessivo sovradimensionamento a priori. Il tutto rientra nell'ottica di interventi meno invasivi e più rispettosi da parte dell'uomo sul territorio. Sempre a tal proposito è stato possibile avere una classifica delle località caratterizzate dagli eventi piovosi più intensi e ciò è una conoscenza utile nella prevenzione dagli eventi di piena.

BIBLIOGRAFIA E FONTI DATI

Annali Idrologici della sezione di Parma-Parte prima, Anni 1940-1991.

Archivio informatico dell' Ufficio Idrografico dell'ARPA Lombardia.

Grafici di pioggia del pluviografo sito in località " Tombe Morte" a Genivolta in dotazione al Consorzio per l'incremento della Irrigazione nel Territorio Cremonese, anni 1980-2003.

Burlando P. e Rosso R., <<Le precipitazioni intense>> pp. 1-32, nel testo di Brath e Maione U., *La sistemazione dei corsi d'acqua naturali*, 1996, Edizioni Bios.

Maione U. e Moisello U., 1993, *Elementi di statistica per l'idrologia*, La goliardica pavese, pp.52-71;

Moisello U., 1998, *Idrologia tecnica*, La goliardica pavese

Rosso R. e Kottegoda N., 1997, *Statistics, probability and reliability for civil and environmental engineers*, pp. 109-112; 450-454

Piga M., Passoni G., 1990 *Analisi Statistica delle piogge intense di breve e brevissima durata nell'area metropolitana di Milano*. Edizioni Città Studi

Andreoli L., Cabrini R., Mariani L., <<Caratteri dell'ambiente e del Territorio>> in *Pianura*, monografia N.2-1997, pagg.13-17.

Leani A., <<Appunti di climatologia cremonese>> in *Contributo allo studio delle acque della provincia di Cremona*, 1996, editrice: Provincia di Cremona, pp. 341-357.

De Michele C. e Rosso R., 2001, *Estratto rapporto nazionale VAPI con aggiornamenti*, Consiglio Nazionale delle Ricerche-Gruppo nazionale per la difesa dalle catastrofi idrogeologiche.