



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
E METODI MATEMATICI^o

QUADERNI DEL DIPARTIMENTO

Department of Information Technology and Mathematical Methods

Working Paper

Series “*Mathematics and Statistics*”

n. 5/MS – 2009

Analisi della Piovosità in Lombardia

e Sistemi di Drenaggio nell'Edilizia

by

L. Piccirillo, C. Fedeli, O. Nicolis, B. Bacchi, M. Finotti, M. Cipriani

COMITATO DI REDAZIONE[§]

Series Information Technology (IT): Stefano Paraboschi
Series Mathematics and Statistics (MS): Luca Brandolini, Ilia Negri

[§] L'accesso alle *Series* è approvato dal Comitato di Redazione. I *Working Papers* della Collana dei Quaderni del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione e Metodi Matematici costituiscono un servizio atto a fornire la tempestiva divulgazione dei risultati dell'attività di ricerca, siano essi in forma provvisoria o definitiva.

Analisi della Piovosità in Lombardia e Sistemi di Drenaggio nell'Edilizia

L. Piccirillo⁽¹⁾, C. Fedeli⁽¹⁾, O. Nicolis⁽¹⁾, B. Bacchi⁽²⁾, M. Finotti⁽³⁾, M. Cipriani⁽³⁾

⁽¹⁾Università degli Studi di Bergamo

⁽²⁾Università degli Studi di Brescia

⁽³⁾Dakota Italia S.p.A.

Riassunto: Le elaborazioni condotte sui dati relativi ai valori estremi di pioggia di massima intensità e breve durata in Lombardia, sono state finalizzate alla individuazione, per ogni stazione, della curva di possibilità pluviometrica che lega l'altezza delle precipitazioni h alla durata t ed al tempo di ritorno T . L'analisi spaziale delle precipitazioni di breve durata e forte intensità è stata condotta tramite l'individuazione delle linee iso- n ed iso- a , con l'impiego dell'algoritmo del *Kriging*, dove a ed n sono i parametri delle curve di possibilità pluviometrica. Si sono quindi utilizzati i risultati delle elaborazioni statistiche condotte sulla pioggia, al fine di garantire una certa precisione nel dimensionamento di sistemi di drenaggio delle acque superficiali, da realizzare con i prodotti della Dakota S.p.A.

1. Introduzione

Un dato essenziale per la progettazione d'infrastrutture idrauliche è rappresentato dalla stima dell'*altezza di pioggia*, per eventi intensi compresi tra un'ora e ventiquattro ore, infatti, le precipitazioni intense di durata giornaliera, o anche inferiore, rappresentano la sollecitazione che può condurre alla crisi di sistemi di drenaggio urbano. Assume quindi un notevole interesse la caratterizzazione statistica delle piogge intense nonché la loro estrapolazione dai punti ove sono ubicate le stazioni di misura a un generico punto di interesse del territorio.

Il primo passo dell'analisi delle piogge intense è costituito dall'elaborazione statistica dei dati pluviometrici registrati nelle stazioni di misura. Le elaborazioni dei dati in questione sono finalizzate alla stima delle curve di possibilità pluviometrica, dette anche

linee segnalatrici, che assumono una grande importanza in idrologia e, in particolare, nella *waste water engineering*, perché hanno molteplici applicazioni.

Nel caso in cui si voglia studiare il fenomeno delle precipitazioni intense in un punto per il quale non si dispone di misure, l'informazione ottenuta dalle osservazioni nelle stazioni della *rete pluviometrica* viene estrapolata nello spazio al fine di fornire indicazioni quantitative sul sito in esame. Il piano di bacino stralcio del torrente Bisagno, il piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dell'autorità di bacino del fiume Po e l'analisi del rischio idraulico inerente alle esondazioni estratto dal PTCP della Provincia di Bergamo costituiscono alcuni esempi in cui le statistiche locali ottenute per ogni stazione sono state interpolate nello spazio tramite procedure geostatistiche (metodo del *Kriging* spaziale) ricavando in tale modo delle mappe regionali con cui valutare i parametri del modello per qualunque sito di interesse.

Nell'ambito del presente lavoro l'analisi puntuale, volta alla determinazione delle curve di possibilità pluviometrica, è stata condotta con riferimento alle modellazioni statistiche per i valori estremi [Coles, 2001], mentre per l'interpolazione spaziale dei parametri del modello probabilistico di pioggia si è fatto ricorso ad un interpolatore basato sulla tecnica statistica di *Kriging* [Cressie, 1991]. Si è giunti così alla redazione di mappe regionali che consentono la lettura immediata dei valori dei parametri di interesse statistico e le stime delle altezze di pioggia per fissata durata e tempo di ritorno. L'attendibilità dei risultati ottenuti è da attribuire all'elevato numero di stazioni considerate ed alla loro distribuzione omogenea all'interno della regione, mentre la peculiarità del lavoro svolto sta nell'utilizzo di dati pluviometrici recenti, aggiornati in massima parte all'anno 2007.

I metodi statistici sono stati implementati tramite il software statistico R [R Development Core Team, 2006], costituito da macro, librerie, oggetti che possono essere utilizzati per la gestione, l'analisi dei dati e la produzione di grafici.

Le curve di possibilità pluviometrica saranno utilizzate per il dimensionamento di sistemi di drenaggio superficiali prodotti dalla Dakota S.p.A., opere atte alla raccolta e allo smaltimento delle acque superficiali dovute alle precipitazioni meteoriche o derivanti dalle attività umane connesse con l'industria, l'edilizia e l'agricoltura.

2. Metodologia

Al fine di mettere a punto e verificare delle tecniche di estrapolazione spaziale, i dati presi a riferimento sono stati quelli osservati nell'ambito della regione Lombardia.

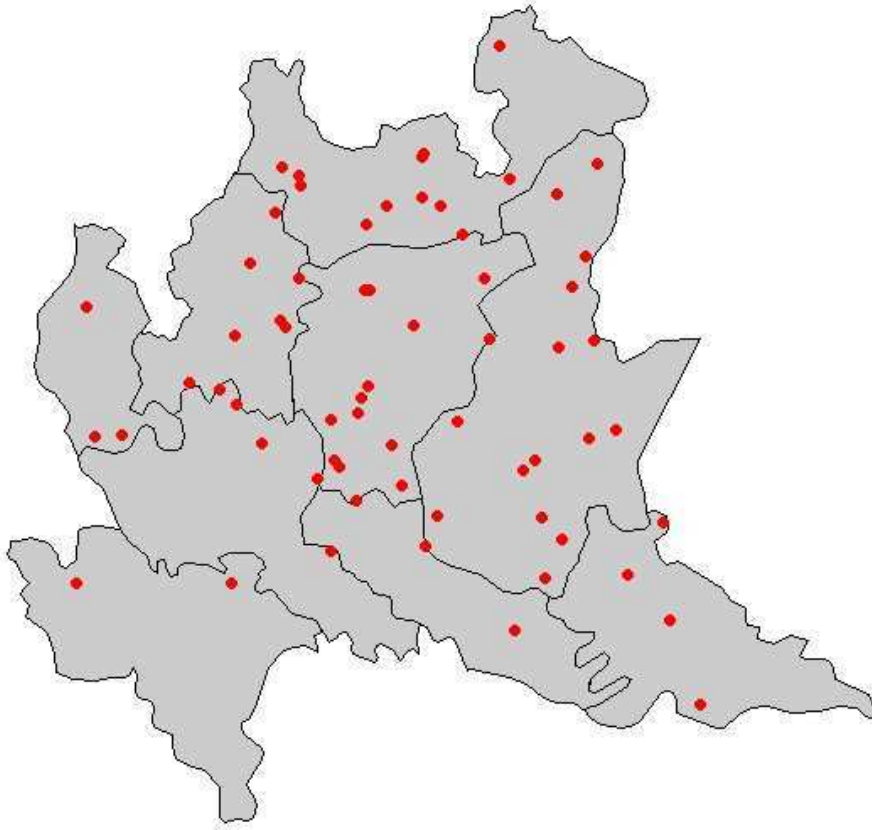


Fig. 1.: Mappa dell'area indagata: stazioni pluviometriche studiate.

Sono stati raccolti dati pluviometrici a partire dal 1955 e aggiornati in massima parte all'anno 2007, allo scopo di fornire risultati quanto più possibile attuali. Sono state individuate e considerate nelle successive elaborazioni statistiche, 67 stazioni aventi una serie storica con una numerosità di dati maggiore o uguale a 10 anni. Per ciascuna stazione si ha una matrice, composta di m righe e da n colonne, dove m rappresenta il numero d'anni in cui sono state effettuate le misurazioni ed n il numero delle durate di riferimento, convenzionalmente assunte pari a 1, 3, 6, 12 e 24 h.

Si considerino a titolo di esempio le elaborazioni svolte sulle serie campionarie di osservazioni relative alla stazione di Genivolta.

Per ogni durata sono stati stimati i valori della media, del massimo, del primo e terzo quartile, della varianza, della deviazione standard, distorta e non, del coefficiente di variazione. Si sono infine stimati, per mezzo del pacchetto *Moments* di R, il coefficiente di asimmetria campionario (indicato con *Skew*) e la curtosi (indicato con *Kurtosis*) per ogni durata.

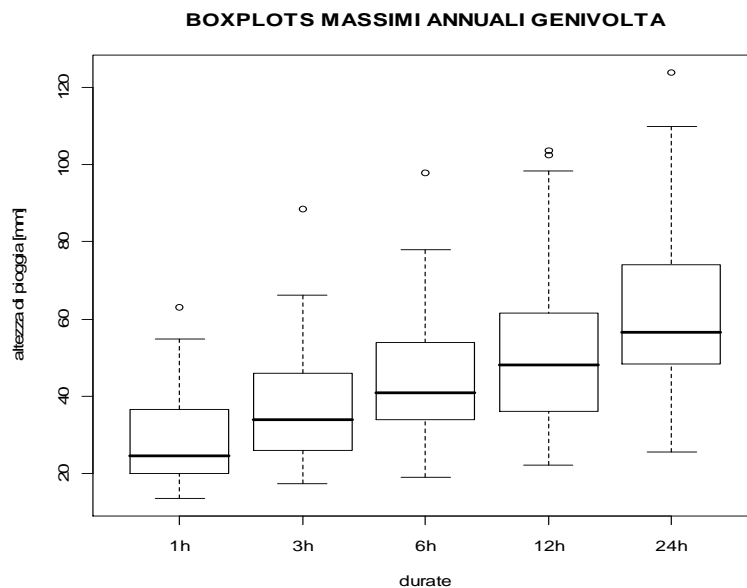


Fig. 2.: Boxplot relativo ai massimi annuali di pioggia per la stazione di Genivolta.

Osservando il *boxplot* sulla statistica relativa ai massimi annuali è possibile notare che i dati presentano un *comportamento dissipativo*, ovvero al diminuire della durata la variabilità del processo tende a diminuire più rapidamente di quanto non faccia la media del processo, inoltre gli *outliers* si trovano sempre al di sopra del valor medio per tutte le durate considerate, a conferma del fatto che le distribuzioni dei dati sono asimmetriche.

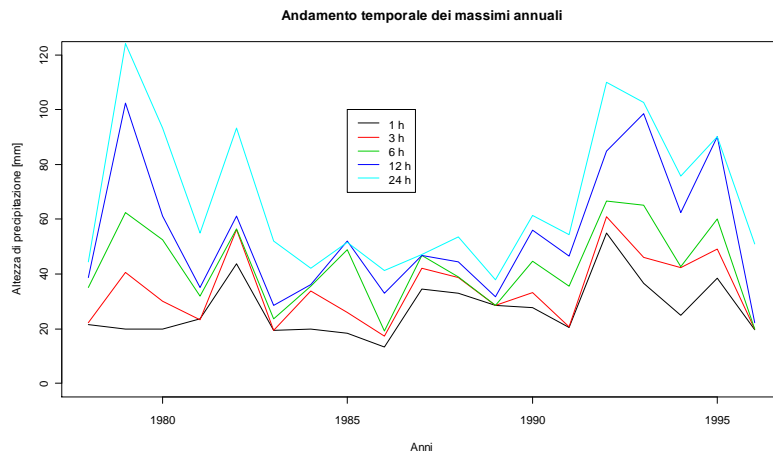


Fig. 3.: Grafico sull'andamento temporale dei massimi annuali rilevati nella stazione di Genivolta per le durate di 1,3,6,12 e 24 h periodo 1978-1996.

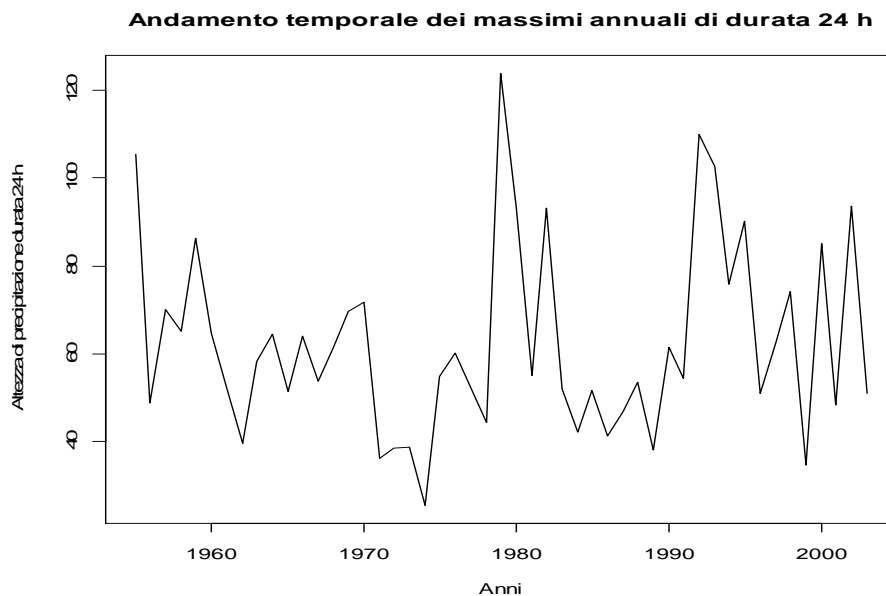


Fig. 4.: Grafico sull'andamento temporale dei massimi annuali rilevati nella stazione di Genivolta per la durata 24 h.

Nel primo grafico sull'andamento temporale dei valori di pioggia massimi si nota, com'era possibile intuire, un incremento dei valori di altezza di pioggia registrati all'aumentare della durata della precipitazione.

Mentre esaminando il secondo grafico, sull'andamento temporale dei massimi annuali di durata 24 h nell'arco del cinquantennio considerato, si osserva che i picchi minimi e massimi sono distribuiti casualmente nel corso del periodo considerato. Ciò costituisce un riscontro dell'elevata variabilità della grandezza misurata.

Le elaborazioni condotte sui dati raccolti sono state finalizzate alla individuazione, per ogni stazione, della relazione statistica che lega l'altezza delle precipitazioni h alla durata t ed al tempo di ritorno T , relazione nota in idrologia come curva di possibilità pluviometrica e che solitamente è esprimibile nella forma monomia

$$h(T,t) = a \cdot t^n \quad (1)$$

in cui i parametri a ed n – funzioni di T – sono da stimare sulla base delle serie storiche dei massimi annuali delle altezze di precipitazione disponibili per le differenti durate pubblicate negli Annali: 1, 3, 6, 12 e 24 ore.

Si è scelto di adottare, tra i vari modelli probabilistici atti ad interpretare la variabilità naturale dei massimi annuali dell'altezza di precipitazione, la distribuzione di Gumbel, in quanto in letteratura risulta la distribuzione di probabilità più idonea a rappresentare la variabilità naturale dei dati campionari. Secondo tale modello la probabilità P di non superamento di un generico valore dell'altezza di pioggia h , di assegnata durata d , è esprimibile con la:

$$P(x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad (2)$$

Poiché la statistica viene effettuata sul massimo valore che in un anno assume la grandezza h , è possibile legare la probabilità P al tempo di ritorno T , definito come il numero di anni in cui, mediamente, h viene superato una sola volta:

$T = 1 - (1/P)$ e quindi dalla (2) si ha:

$$h = u - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (3)$$

dove u e α sono i parametri della distribuzione legati ai momenti del I e del II ordine del campione dalle relazioni:

$$\alpha = \frac{1,283}{\sigma(x)}$$

$$u = \mu(x) - 0,450\sigma(x) \quad (4)$$

con $\mu(x)$ media e $\sigma(x)$ scarto quadratico medio del campione stesso.

Per avere un riscontro visivo e pratico dell'andamento sperimentale dei dati su quello probabilistico, vengono di seguito messe a confronto le rappresentazioni delle curve di frequenza cumulata con quelle di distribuzione di probabilità per le varie durate. A titolo di esempio si osservino le figure riferite alla stazione di Genivolta.

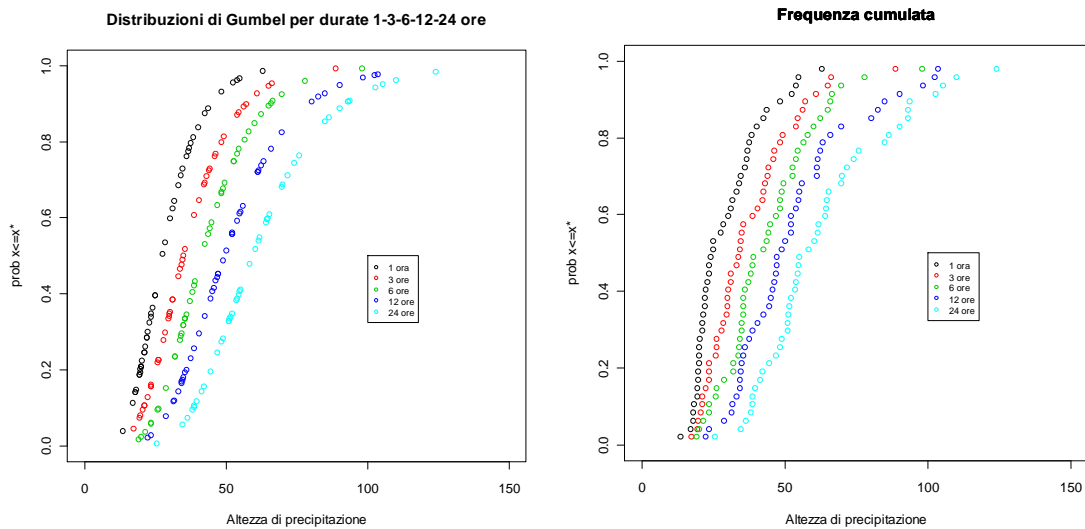


Fig. 5.: Confronto tra i valori di probabilità di non superamento teorici e campionari.

Il primo indica le distribuzioni probabilistiche, mentre il secondo rappresenta l'andamento sperimentale dei dati. Per il calcolo della frequenza campionaria è stata utilizzata la relazione "*Weibull plotting position*". Una prima valutazione visiva porta ad affermare che nel caso di questa stazione la distribuzione di Gumbel ben interpreta i dati misurati, in quanto le due dispersioni sono simili. Tuttavia, allo scopo di decretare a livello formale il buon adattamento di una distribuzione di probabilità, è necessario ricorrere ad un approccio oggettivo e rigoroso. Per questa ragione è stato effettuato per ciascuna stazione il test di Kolmogorov-Smirnov.

Tale test risulta soddisfatto se l'estremo superiore D_N della differenza in valore assoluto tra la funzione di ripartizione teorica ed empirica

$$D_N = \max \left| P(x_i) - \frac{i}{N} \right| \quad (5)$$

risulta inferiore ad un D_n critico, dipendente sia dalla numerosità del campione che dal livello di significatività del test:

$$D_N \leq \frac{1.3851}{\sqrt{N}} = D_{N \text{ critico}} \quad (6)$$

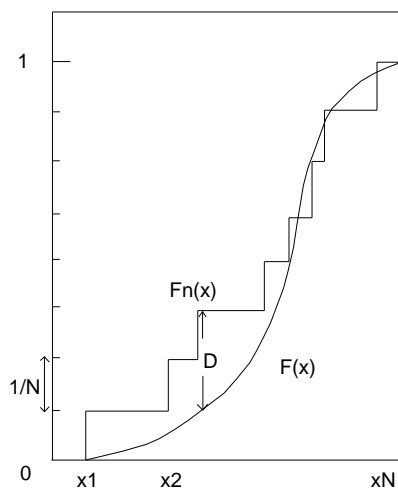


Fig. 6.: Confronto tra la distribuzione teorica $F(X)$ e la curva di frequenza cumulata $F_n(x)$.

Nella seguente tabella sono riportati gli esiti del test per alcune delle 67 stazioni:

STAZIONI	Dn 1h	Dn 3h	Dn 6h	Dn 12h	Dn 24h	Dn critico
Borgonato	0,107	0,076	0,092	0,108	0,086	0,257
Bormio	0,111	0,081	0,092	0,057	0,064	0,231
Breno	0,088	0,107	0,117	0,097	0,169	0,225
Calvisano	0,118	0,104	0,072	0,064	0,087	0,295
Campo moro	0,056	0,067	0,133	0,114	0,113	0,310
Campo tartano	0,072	0,107	0,096	0,081	0,109	0,336
Ceresara	0,134	0,147	0,109	0,121	0,081	0,370
Chiari	0,060	0,068	0,073	0,085	0,057	0,277
Clusone	0,125	0,056	0,080	0,076	0,097	0,234
Codera	0,104	0,065	0,133	0,072	0,124	0,302
Dezzo di Scalve	0,071	0,142	0,085	0,156	0,109	0,326
Edolo	0,072	0,071	0,071	0,069	0,082	0,257
Fontanella	0,131	0,159	0,054	0,064	0,060	0,283
Fusine	0,079	0,103	0,096	0,140	0,054	0,272
Gavardo	0,130	0,098	0,174	0,192	0,189	0,346

Gaver	0,090	0,063	0,059	0,066	0,080	0,257
Genivolta	0,079	0,049	0,048	0,054	0,066	0,204
Ghedi	0,081	0,069	0,083	0,128	0,097	0,249
Gorno	0,070	0,063	0,092	0,081	0,121	0,302
Introbio	0,105	0,113	0,058	0,119	0,164	0,295
Lago Cancano	0,118	0,101	0,053	0,045	0,107	0,262
Lago d'Arno	0,196	0,066	0,048	0,056	0,098	0,302
Lanzada	0,151	0,046	0,102	0,045	0,078	0,272
Lecco	0,115	0,080	0,085	0,122	0,170	0,262
Martinengo	0,095	0,089	0,124	0,078	0,104	0,318
Memmo	0,108	0,060	0,073	0,076	0,091	0,310
Mozambano	0,067	0,061	0,061	0,086	0,059	0,261
Orzinuovi	0,061	0,133	0,087	0,133	0,141	0,346
Pieve S. Giacomo	0,100	0,105	0,099	0,082	0,056	0,253
Salò	0,128	0,052	0,079	0,151	0,235	0,346
Scais	0,103	0,119	0,047	0,140	0,119	0,336
S. Caterina V.	<u>0,323</u>	<u>0,262</u>	0,134	0,054	0,135	0,262
S. Martino de C.	0,104	0,136	0,138	0,140	0,078	0,317
Sondrio	0,113	0,089	0,061	0,091	0,217	0,317
Temù	0,051	0,053	0,092	0,048	0,049	0,295
Tirano	0,085	0,098	0,058	0,076	0,046	0,310
Trepalle	0,108	0,073	0,071	0,041	0,118	0,358
Treviglio	0,136	0,079	0,075	0,128	0,090	0,248
Val morta	0,150	0,169	0,210	0,100	0,122	0,438
Valle ratti	0,101	0,059	0,070	0,130	0,072	0,283

Tab. 1.: Esiti del test di Kolmogorov per la distribuzione di Gumbel.

Il test è stato superato da tutte le stazioni prese in esame, pertanto è possibile affermare che la distribuzione di Gumbel ben interpreta l'andamento dei dati.

Prefissato quindi un tempo di ritorno T , tramite l'espressione (3) si sono calcolate le altezze di pioggia per le varie durate (1, 3, 6, 12, 24 ore) introducendo di volta in volta i parametri u e α calcolati con la (4) sui campioni disponibili per le durate stesse. I 5 valori di altezza ottenuti, posti sul piano ($\log h$, $\log d$) sono stati interpolati tramite una retta adottando il metodo dei minimi quadrati. In tal modo si sono ottenuti per i tempi di ritorno di 5, 10, 25, 50 anni i valori dei parametri a ed n delle equazioni delle curve di possibilità pluviometrica per ciascuna delle 67 stazioni pluviometriche esaminate. Nella

seguinte tabella sono riportati i parametri caratteristici delle curve segnalatrici con le rispettive deviazioni standard per i tempi di ritorno di cinque e dieci anni:

STAZIONE	T=5 anni					T=10 anni				
	R ²	a(T)	Dev.st	n(T)	Dev.st	R ²	a(T)	Dev.st	n(T)	Dev.st
Borgonato	1,00	34,06	1,02366	0,30	0,01149	0,99	39,67	1,03077	0,30	0,01490
Bormio	0,99	14,45	1,04198	0,45	0,02021	0,99	16,76	1,05922	0,45	0,02828
Breno	0,99	24,91	1,03398	0,31	0,01643	0,99	29,18	1,03861	0,32	0,01862
Calvisano	0,99	35,02	1,03314	0,24	0,01603	0,99	40,74	1,03281	0,24	0,01587
Campo moro	1,00	15,60	1,03774	0,45	0,01821	0,99	18,25	1,05479	0,43	0,02622
Campo t.	1,00	25,42	1,00360	0,40	0,00176	1,00	29,57	1,01524	0,40	0,00743
Ceresara	0,96	48,34	1,05548	0,22	0,02655	0,94	60,62	1,06719	0,21	0,03197
Chiari	1,00	38,98	1,01156	0,27	0,00564	0,99	44,83	1,01669	0,27	0,00813
Clusone	1,00	30,86	1,01310	0,38	0,00639	1,00	34,81	1,01637	0,38	0,00798
Codera	0,99	33,45	1,04082	0,32	0,01967	0,98	38,84	1,04648	0,31	0,02233
Dezzo di s.	0,99	31,69	1,05051	0,42	0,02422	0,99	36,63	1,06133	0,42	0,02926
Edolo	1,00	19,72	1,03493	0,43	0,01688	0,99	22,66	1,04695	0,43	0,02255
Fontanella	1,00	32,91	1,01031	0,25	0,00504	1,00	38,57	1,01399	0,24	0,00683
Fusine	0,99	14,78	1,06104	0,44	0,02913	0,98	17,53	1,07987	0,43	0,03777
Gavardo	0,99	34,50	1,03605	0,31	0,01741	0,99	39,90	1,04191	0,29	0,02018
Gaver	1,00	26,17	1,03302	0,48	0,01597	1,00	29,71	1,03864	0,48	0,01864
Genivolta	1,00	37,50	1,01026	0,23	0,00501	1,00	44,40	1,01156	0,23	0,00565
Ghedì	0,99	33,25	1,02287	0,22	0,01111	0,99	38,96	1,02252	0,20	0,01095
Gorno	0,99	46,11	1,03083	0,32	0,01493	0,99	53,89	1,04249	0,31	0,02046
Introbio	0,99	37,12	1,04388	0,33	0,02111	0,98	44,53	1,05295	0,31	0,02536
Lago Cancano	0,99	13,49	1,05001	0,54	0,02399	0,99	15,12	1,06201	0,54	0,02957
Lago d'Arno	0,99	22,12	1,04841	0,47	0,02323	0,99	25,50	1,04453	0,47	0,02142
Lanzada	0,99	16,06	1,05797	0,46	0,02770	0,98	18,15	1,08201	0,45	0,03875
Lecco	0,99	40,51	1,03757	0,35	0,01814	0,99	46,26	1,05195	0,38	0,02490
Martinengo	1,00	35,64	1,01091	0,20	0,00533	1,00	41,61	1,01292	0,19	0,00631
Memmo	0,99	33,11	1,04938	0,37	0,02369	0,98	38,35	1,06115	0,36	0,02917

Mozambano	1,00	34,87	1,01363	0,21	0,00665	1,00	40,73	1,01581	0,20	0,00771
Orzinuovi	0,99	36,60	1,02439	0,22	0,01185	0,99	44,44	1,02442	0,19	0,01186
Pieve S.G.	1,00	41,84	1,00963	0,24	0,00471	1,00	51,78	1,01748	0,23	0,00851
Salò	0,99	34,00	1,03671	0,31	0,01772	0,99	40,53	1,03997	0,30	0,01927
Scais	1,00	24,84	1,04031	0,58	0,01943	0,99	28,04	1,05215	0,58	0,02499
S. Mart. De C.	0,99	34,99	1,04852	0,39	0,02329	0,99	39,93	1,04787	0,38	0,02299
Sondrio	1,00	18,33	1,01310	0,45	0,01836	0,99	21,31	1,04128	0,45	0,01989
Temù	0,99	17,93	1,04138	0,46	0,01993	0,99	20,44	1,05347	0,47	0,02561
Tirano	0,95	25,75	1,06092	0,21	0,02907	0,92	31,34	1,06841	0,19	0,03253
Trepalle	0,99	14,04	1,04876	0,45	0,02340	0,99	16,08	1,06682	0,45	0,03179
Treviglio	0,97	39,51	1,04811	0,22	0,02310	0,95	47,79	1,05914	0,21	0,02825
Val morta	0,98	20,19	1,07875	0,52	0,03726	0,98	22,16	1,08178	0,52	0,03864
Valle ratti	0,99	28,07	1,04441	0,35	0,02136	0,98	32,13	1,05731	0,35	0,02739
Agrate	1,00	34,73	1,01723	0,24	0,00840	0,99	40,92	1,02786	0,23	0,01351
Bg Garibaldi	1,00	38,52	1,00282	0,26	0,00138	1,00	44,82	1,00948	0,26	0,00463
Bg Goisis	0,98	33,95	1,04333	0,27	0,02085	0,98	39,78	1,04684	0,27	0,02254
Bg S.Giorgio	0,97	30,76	1,06564	0,31	0,03126	0,96	35,74	1,07664	0,32	0,03630
Bs Itaspastori	0,92	45,29	1,09303	0,26	0,04373	0,91	51,91	1,10646	0,27	0,04973
Bs Ziziola	0,96	28,55	1,07080	0,28	0,03363	0,95	37,06	1,07568	0,27	0,03586
Bustoarsizio	1,00	41,16	1,01157	0,23	0,00565	1,00	48,56	1,01040	0,21	0,00508
Capralba	0,96	35,72	1,04939	0,21	0,02370	0,96	42,80	1,04450	0,19	0,02140
Casatebrianza	0,98	39,38	1,05119	0,27	0,02454	0,97	48,02	1,05575	0,25	0,02667
C. d' Agogna	0,97	30,29	1,06120	0,27	0,0292	0,95	36,18	1,07287	0,26	0,03458
Colico	0,98	23,34	1,08178	0,42	0,03864	0,97	27,82	1,08664	0,41	0,04085
Costa Volpino	0,93	34,71	1,09158	0,26	0,04308	0,90	39,70	1,10906	0,27	0,05088
Curtatone	0,85	29,50	1,16683	0,31	0,07585	0,83	35,20	1,18025	0,31	0,08147
Erba	0,96	54,54	1,06014	0,25	0,02871	0,95	64,29	1,06669	0,23	0,03173
Filago	0,95	45,95	1,09370	0,32	0,04403	0,94	58,64	1,10601	0,33	0,04953
Gambara	0,99	24,16	1,04019	0,32	0,01937	0,99	29,60	1,04419	0,34	0,02125
Lonate P.	0,99	32,93	1,03567	0,33	0,01723	0,99	38,55	1,04284	0,33	0,02062

Mariano C.	0,96	36,78	1,06439	0,28	0,03068	0,95	39,49	1,08567	0,30	0,04040
Mi via Juvara	0,96	33,76	1,07685	0,32	0,03639	0,96	40,13	1,07574	0,31	0,03589
Minoprio	0,99	51,85	1,02463	0,27	0,01196	0,99	62,34	1,03081	0,28	0,01492
Palidano	0,93	50,20	1,06142	0,19	0,02930	0,92	61,63	1,06284	0,18	0,02995
Piazza B.	0,99	40,10	1,04095	0,29	0,01973	0,97	46,60	1,05805	0,29	0,02774
Riv. d'Adda	0,94	39,59	1,11665	0,36	0,05424	0,93	46,48	1,12328	0,37	0,05714
Samolaco	0,99	35,75	1,03324	0,27	0,01608	0,99	43,06	1,03531	0,26	0,01706
S. Angelo l.	0,97	30,46	1,06351	0,32	0,03027	0,96	36,99	1,07213	0,31	0,03424
Stezzano	0,98	34,42	1,05340	0,29	0,02557	0,96	40,48	1,06478	0,29	0,03085
Va Vidoletti	0,97	42,35	1,06543	0,32	0,03115	0,97	48,84	1,07049	0,32	0,03348
Varenna	0,99	35,81	1,05051	0,35	0,02422	0,98	43,77	1,05486	0,33	0,02625

Tab. 2.: Parametri caratteristici delle curve segnalatrici con le rispettive deviazioni standard per i tempi di ritorno 5 e 10 anni.

Come precedentemente accennato l'analisi spaziale delle precipitazioni di breve durata e forte intensità è stata condotta tramite l'individuazione delle linee iso- n ed iso- a , dove a ed n sono i parametri delle curve di possibilità pluviometrica per i succitati tempi di ritorno. Per tali rappresentazioni si sono localizzate preliminarmente le stazioni pluviografiche in base alle geografiche. Sulla base dei valori dei parametri n_5 , n_{10} , n_{25} , n_{50} , ed a_5 , a_{10} , a_{25} , a_{50} , ottenuti dalle elaborazioni descritte si sono costruite le relative carte delle isolinee con l'impiego dell'algoritmo del *Kriging*.

L'interpolazione spaziale attraverso la tecnica del *Kriging* si fonda sulle osservazioni disponibili in n collocazioni spaziali $y = \{y(u_i), \dots, y(u_n)\}'$ generate dal processo spaziale Y per il quale si ipotizza la seguente struttura:

$$Y(u) = \mu(u) + \varepsilon(u) \quad \forall u \in S \quad (7)$$

dove $\mu(u)$ rappresenta una componente deterministica di trend spaziale ed $\varepsilon(u)$ costituisce un processo spaziale debolmente stazionario di media nulla. Nel presente lavoro è stata adottata la tipologia di *kriging ordinario*, ovvero si è assunto che la componente di trend spaziale fosse ignota per ogni localizzazione.

Il *Kriging* considera la struttura di covarianza spaziale dei dati mediante la matrice di varianze e covarianze o la matrice dei variogrammi.

Abbiamo rappresentato il variogramma sperimentale e per l'approssimazione è stato utilizzato il *modello esponenziale* per la maggiore semplicità computazionale. Di seguito si riportano, a titolo d'esempio le rappresentazioni grafiche ottenute, per la stima del variogramma relativo al coefficiente a ($T = 5$ anni).

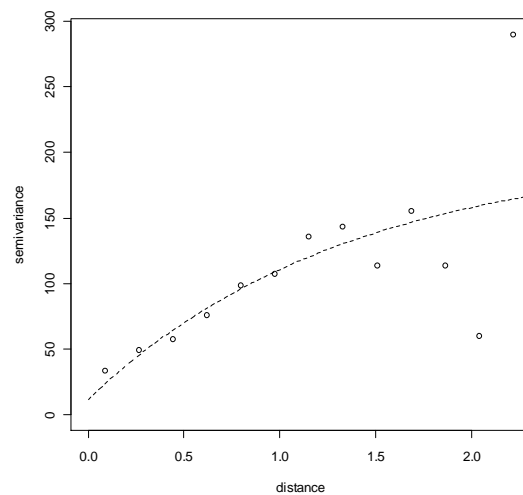
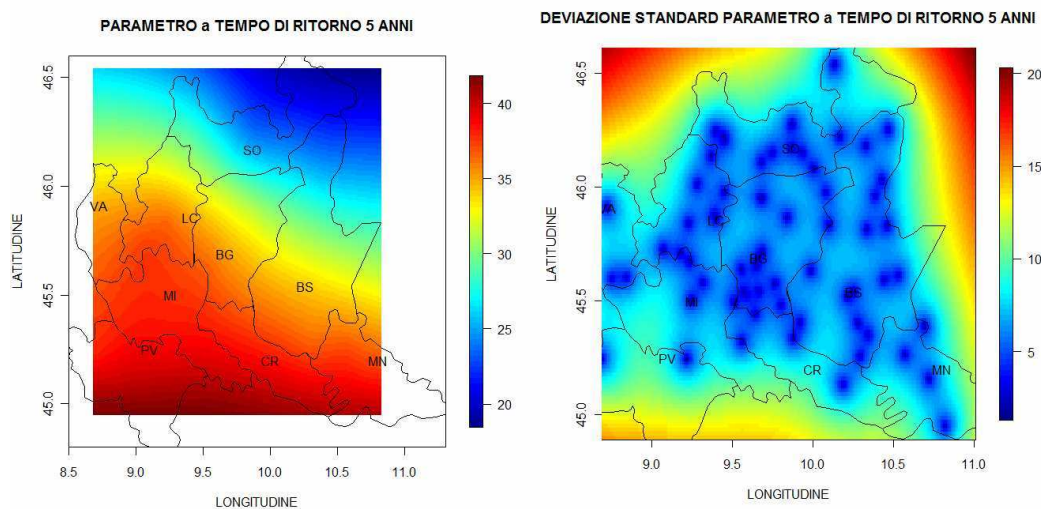


Fig. 7.: Modello di variogramma esponenziale e variogramma sperimentale.

Sono di seguito rappresentate, a titolo di esempio, le carte sulla stima dei parametri n_5 , a_5 con le mappe sulle deviazioni standard associate ai parametri.



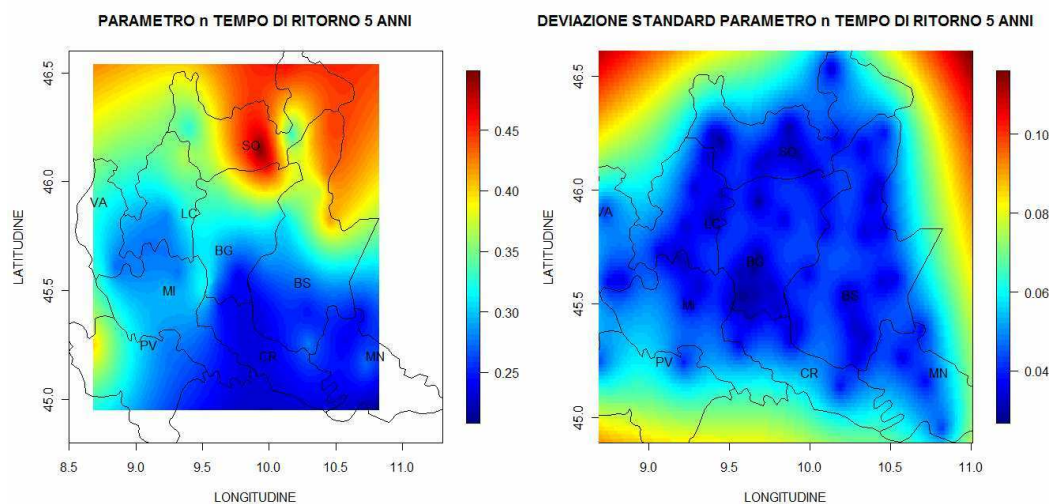


Fig. 8.: Mappe sull'andamento dei parametro a ed n con deviazioni standard ($T=5$).

È possibile osservare che nella zona di pianura i valori stimati del parametro a_t , che rappresentano l'altezza delle precipitazioni orarie, sono alquanto elevati mentre nella zona montana si registrano le misurazioni più basse.

Per quanto riguarda la precisione dei risultati ottenuti dall'interpolazione spaziale si osserva che all'interno della regione esaminata la deviazione standard sul parametro a è molto bassa e assume valori minimi in corrispondenza delle stazioni pluviometriche.

Il parametro n_t presenta in generale, per ogni tempo di ritorno, un andamento sensibilmente crescente procedendo da Sud verso Nord. Anche per le mappe associate al parametro n , si riscontra una buona precisione dei risultati ottenuti dall'interpolazione spaziale.

Sulla base dei risultati ottenuti è possibile individuare due comportamenti climatici differenti all'interno della Regione.

Le precipitazioni più intense alle quote medio-alte sono spesso di tipo orografico o misto, mentre quelle alle basse quote sono da considerarsi di tipo prevalentemente convettivo. Nella pianura e sulle colline pre-alpine il fenomeno temporalesco è, di norma, dovuto a moti ascendenti d'aria calda e leggera che si è riscaldata in vicinanza del suolo. Questa, risalendo verso l'alta atmosfera, si espande e si raffredda incrementando la propria umidità relativa finché, ad una certa quota, giunge a saturazione.

La condensazione infine, liberando calore, permette all'aria di innalzarsi ulteriormente finché perviene ad una temperatura abbastanza bassa da poter dare inizio al fenomeno della precipitazione, in conseguenza alla formazione di gocce di pioggia.

Queste precipitazioni sono tipiche dei climi caldi quindi sono le classiche precipitazioni che caratterizzano i temporali estivi nelle zone temperate e in genere le piogge delle zone tropicali.

Il fenomeno convettivo è, in genere, molto intenso, di durata media pari a 20 minuti, e copre limitate superfici. Ciò spiega i valori elevati del parametro a_t alle quote più basse.

Nel caso delle precipitazioni orografiche, il fenomeno di innalzamento delle masse d'aria caldo-umida è da ascrivere ad una causa differente.

Infatti, il fronte d'aria calda e umida, incontrando sul suo percorso una barriera orografica (rilievi montuosi), s'innalza fino a raggiungere quote alle quali la temperatura è sufficientemente bassa da poter innescare il fenomeno di precipitazione. La maggiore precipitazione è attesa sul versante investito dalle correnti umide.

Giacché tuttavia il moto è prodotto da venti di una certa insistenza, questi processi tendono a caratterizzarsi con una maggiore durata del rovescio meteorico, anche sovente di intensità minore rispetto a quelli convettivi, da qui scaturiscono i valori elevati del parametro n_t alle quote più alte.

3. Applicazioni

I risultati dell'analisi statistica delle piogge effettuata vengono di seguito utilizzati per dimensionare una linea di canalizzazione, infatti dalla curva di possibilità pluviometrica si può ricavare la pioggia che dà origine alla portata di massima piena in un corso d'acqua, pioggia che viene denominata "*pioggia critica*".

Secondo il *modello cinematico o della corrivazione*, per una precipitazione estesa a tutta la superficie scolante è possibile determinare l'evento critico di pioggia che è quello di durata pari al tempo di corrivazione t_c dell'area colante, che è il più piccolo dei tempi per i quali contribuisce alla formazione della portata l'intera area del bacino.

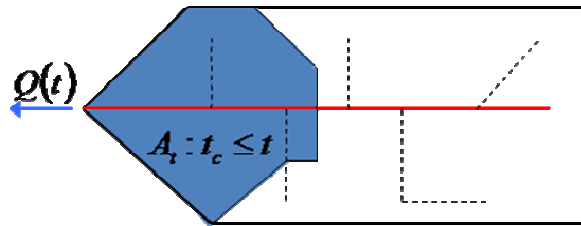


Fig. 9.: Schematizzazione del modello cinematico.

Per una corretta ed adeguata progettazione di una linea di canalizzazione, è indispensabile calcolare la portata di massima piena che si può verificare in un corso d'acqua. Il metodo qui utilizzato per il calcolo della portata conseguente ad un'assegnata precipitazione, è il *metodo razionale* in base al quale la portata con tempo di ritorno T è espressa tramite la seguente relazione che applicheremo in seguito:

$$Q = \frac{(\beta \cdot I_{cr} \cdot A)}{3600} \quad (8)$$

Per la realizzazione di un efficiente sistema di drenaggio delle acque sarà presa in considerazione la linea di canalette Taurus prodotta dalla Dakota.

La canaletta Taurus, sotto raffigurata, è realizzata in polietilene *High-Density*, completata con griglie in Polipropilene, Acciaio Inox.



Fig. 10.: Canaletta Taurus.

In fase di progettazione, la portata massima di deflusso, di cui si è trattato in precedenza, deve essere confrontata con i valori di portata delle canalette. Queste ultime vengono determinate secondo la formula di Chezy che richiede la conoscenza di diversi parametri:

$$Q = v \cdot \Omega \quad (9)$$

La seguente tabella riassume i risultati delle portate drenanti di canalette di varie dimensioni, calcolate con la formula di Chezy

Portata d'acqua canali DAKOTA													
CANALE	Passaggio Acqua						Coef. Attrito	Coef. Scabrosità Bazin	Pendenza %				
	H	L	Ω	$\Pi_{BagTeori}$	$\Pi_{BagnMis}$	R_1			0,50%	1%	1,50%	2%	3%
	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm			Portate Litri/secondo				
TAURUS 130x40	40	105	4200	185	168	25	63.07	0.06	2.96	4.19	5.13	5.92	7.25
TAURUS 130x75	75	105	7875	255	240	33	65.35	0.06	6.59	9.32	11.42	13.18	16.15
TAURUS 130x150	150	105	15750	405	381	41	67.18	0.06	15.21	21.51	26.35	30.42	37.26
TAURUS 200x75	75	173	13494	329	300	45	67.81	0.06	13.72	19.41	23.77	27.45	33.62
TAURUS 200x150	150	173	25950	473	455	57	69.53	0.06	30.47	43.09	52.77	60.94	74.63
TAURUS 250x75	75	200	15000	350	320	47	68.12	0.06	15.64	22.12	27.10	31.29	38.32
TAURUS 250x150	150	200	30000	500	485	62	70.09	0.06	36.98	52.30	64.05	73.96	90.58

Fig. 11.: Valori di portate drenanti delle canalette [Manuale Tecnico Canalette Taurus].

Prendiamo in esame ora il seguente parcheggio auto privato asfaltato supponendo per ipotesi che esso sia localizzato nella città di Lecco.

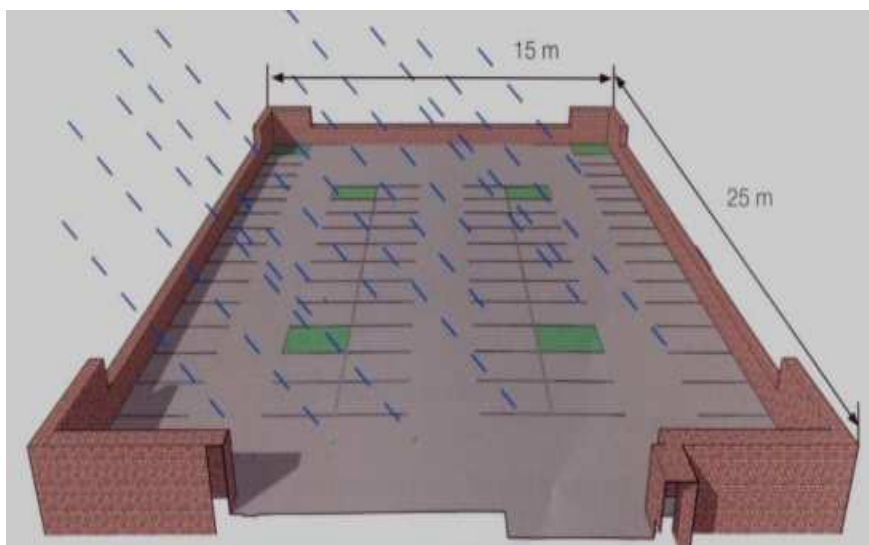


Fig. 12.: Piazzale in esempio.

Si voglia dimensionare una linea di canalizzazione per la raccolta e lo smaltimento dell'acqua piovana, servendosi dei risultati ottenuti dalle elaborazioni statistiche.

Considerando che la superficie in questione è pari a 375 m^2 si ottiene un tempo di corrivazione di 0,09 h. Assumendo un tempo di ritorno pari a 5 anni si estraggono dai risultati dell'analisi statistica i corrispondenti coefficienti della curva di possibilità pluviometrica per la stazione di Lecco: $a = 40,51 \text{ mm/h}$, $n = 0,35$. Si procede dunque con la determinazione dell'intensità piovosa critica:

$$I_{cr}(\text{mm/h}) = a \cdot t_c^{n-1} = 193,78 \text{ mm/h} \quad (10)$$

e si calcola la portata volumica d'acqua da evacuare attraverso l'applicazione del metodo razionale, nel quale considerando che la superficie è pavimentazione asfaltata, si assume un coefficiente di deflusso β pari a 0,9:

$$Q = \frac{(\beta \cdot I_{cr} \cdot A)}{3600} = \frac{(0,9 \cdot 193,78 \text{ mm/h} \cdot 375)}{3600} = 18,17 \text{ l/s} \quad (11)$$

Essendo nota la portata d'acqua da rimuovere, si procede infine alla scelta del canale più idoneo, in base alla tabella delle portate vista prima.

Qualora si volesse dimensionare una linea di drenaggio un parcheggio di medesime dimensioni in un punto qualunque della regione Lombardia, sarebbe sufficiente estrarre dalla mappa sotto riportata il valore dell'intensità piovosa critica corrispondente per determinare immediatamente la portata d'acqua da rimuovere e la canaletta più idonea.

Pertanto tale mappa, realizzata con l'impiego dell'algoritmo del *Kriging* in modo analogo a quelle dei parametri a ed n , costituisce uno strumento direttamente fruibile dal progettista di sistemi di drenaggio.

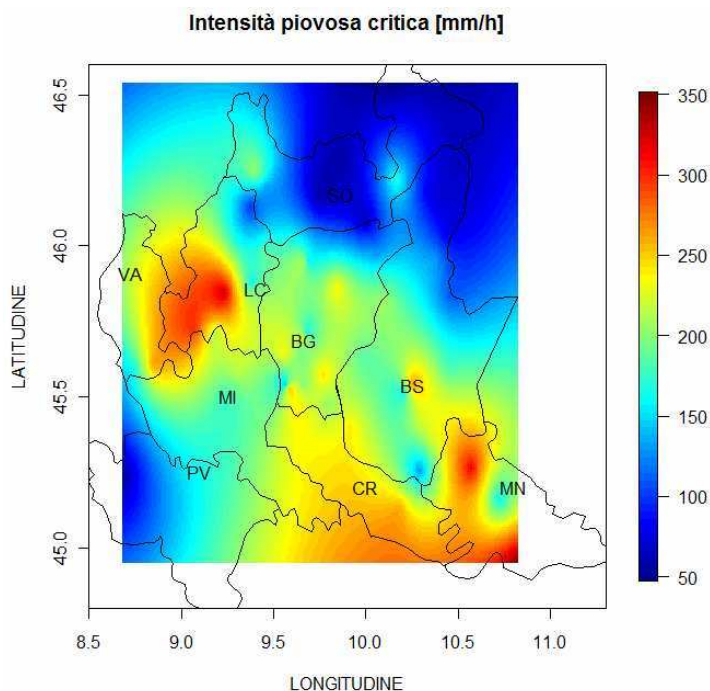


Fig. 13.: Mappa sulla piovosità critica della regione.

4. Conclusioni

L'elaborazione dei dati pluviometrici ottenuti da 67 stazioni di rilevamento site nella Regione Lombardia ha consentito di derivare le equazioni delle curve di possibilità pluviometrica locali. Tali equazioni sono state utilizzate sia per determinare le altezze di pioggia che ricorrono, mediamente, ogni T anni per ogni durata di pioggia t sia per ricavare l'intensità media di precipitazione i corrispondente.

Con riferimento all'analisi puntuale va ricordato che la distribuzione di Gumbel, adottata per interpretare la variabilità campionaria delle piogge massime annuali per durate comprese tra 1 e 24 ore, ha mostrato un buon grado di adattamento alle curve delle frequenze campionarie in base ai risultati ottenuti dal test di Kolmogorov.

Si è già discusso dei risultati ricavati dall'analisi spaziale delle precipitazioni intense: le mappe che riportano le isolinee dei coefficienti delle curve di possibilità pluviometrica permettono di determinare il valore dei suddetti parametri in qualsiasi punto della zona indagata, una volta fissato il tempo di ritorno di interesse.

Inoltre l'incertezza associata ai coefficienti è sempre piuttosto bassa in tutta l'area indagata, com'è possibile desumere dalle mappe delle deviazioni standard, ciò conferma l'attendibilità dei risultati derivanti dall'analisi spaziale, dovuta sostanzialmente

all'elevato numero di stazioni considerate, ed alla loro distribuzione omogenea all'interno della regione.

Il procedimento di ricerca delle equazioni pluviometriche locali adottato nel presente lavoro è oltremodo complesso ed articolato e differisce dalla pratica comune che consiste nell'utilizzo di equazioni di possibilità pluviometrica di validità generale, ovvero utilizzabili per aree del territorio italiano, erroneamente considerate omogenee dal punto di vista climatico. Si è soliti, infatti, assumere una piovosità critica di 100 *mm/h* per il Nord Italia, 80 *mm/h* per il Centro Italia e 60 *mm/h* per il Sud Italia, trascurando così comportamenti climatici differenti che possono essere presenti all'interno di una stessa Regione.

Tuttavia l'applicazione di queste ultime equazioni è spesso causa di approssimazioni inaccettabili, infatti, dalla mappa riportata sulla piovosità critica è facile intuire che l'assunzione di un valore pari a 100 *mm/h* per tutto il nord Italia può condurre, nella maggior parte dei casi, ad un sottodimensionamento o sovradimensionamento delle linee di canalizzazione, con conseguenti danni.

Al contrario le elaborazioni condotte nella presente tesi hanno permesso di ottenere una certa precisione nella progettazione e dimensionamento dei sistemi di drenaggio superficiali prodotti dalla Dakota.

Abbiamo già raccolto i dati pluviometrici per le regioni del nord Italia e l'obiettivo futuro è quello di realizzare anche per le altre regioni le elaborazioni statistiche svolte per la Lombardia.

Bibliografia

- Bacchi B., Mariani M., Ranzi R., Analisi delle piogge di breve durata e forte intensità a scala regionale: Pianura Padana Valtellina e Orobie, Brescia, Dicembre 1994.
- Burlando P., R. Rosso, Modelli di Previsione Statistica delle Piogge Intense di Progetto, Milano, Programma di Istruzione Permanente, 367-421, 1991.
- Coles S., An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values, Springer Series in Statistics, 2001.

- Corte-Real J., Qian B., Xu H., Regional climate change in Portugal: precipitation variability associated with large-scale atmospheric circulation, *International Journal of Climatology*, 18, 619-635, 1998.
- Cressie N., Statistics for Spatial Data, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 1991.
- Horeschi D., Sulla Stima delle curve di possibilità pluviometriche nella Provincia di Cremona: elaborazione ed analisi di nuove ed esistenti serie storiche, 2004.
- Kottegoda N. T., Rosso R., Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers, Blackwell Publishing, 2008.
- Perica S., E. Foufoula-Georgiou, Model for multiscale disaggregation of spatial rainfall based on coupling meteorological and scaling descriptions, *Journal of Geophysical Research*, 101(D21), 26347-26361, 1996.
- Piccirillo L., Analisi dell piovosità in Lombardia e progettazione di sistemi di drenaggio nell'edilizia, 2009.
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0 URL <http://www.R-project.org>, 2006.
- Riesco J., Tamayo J., Alcover V., Heavy maritime rainfall in the valencia region: the 6 to 8 may 2002 situation, *Mediterranean storms*, 2002.
- Serinaldi F., Analysis of inter-gauge dependence by Kendall's s_K , upper tail dependence coefficient, and 2-copulas with application to rainfall fields, *Stoch Environ Res Risk Assess*, 22, 671-688, 2008.
- Velasco C., Cassiraga E., Sempere-Torres D., Sanchez-Diezma R., Gomez-Hernandez J., Merging radar and rainguages data to estimate rainfall fields: an improved geostatistical approach using non-parametric spatial models, *Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar*, 2004