

Relazione tecnico-scientifica finale sull'attività svolta II anno

PROGETTO: CLIMAGRI . *Cambiamenti climatici e Agricoltura*

SOTTOPROGETTO: 3 –Siccità, desertificazione e gestione delle risorse idriche

TITOLO DELLA RICERCA: Stima statistica descrittiva di alcuni casi sperimentali di incremento artificiale delle precipitazioni

Responsabile della ricerca: Prof.ssa Francesca Gallo

Collaboratori: Prof.ssa Giovanna Jona Lasinio, Dott.ssa Arianna Orasi

Ente: Università di Roma "La Sapienza" Dip. di Statistica, Probabilità e Statistiche Applicate

1. Introduzione

Nel corso del secondo anno di progetto si è proceduto, oltre al completamento delle attività del primo anno volte per lo più all'acquisizione di tutte le informazioni disponibili relative **alle attività di incremento artificiale delle precipitazioni in Puglia (Progetto Pioggia)**, ad un'accurata analisi della variabilità spaziale e temporale dei valori di pioggia rilevati dalla rete UCEA nel corso dell'esperimento. In particolare si è concentrata l'attenzione su tutti i mesi in cui è stata effettuata almeno un'operazione di semina. Oltre a ciò si è provveduto a rendere utilizzabili i dati radar, laddove disponibili, ed in questo ambito si è voluta porre l'attenzione in particolare su 6 episodi di semina, due per ciascuno degli anni dal 1992 al 1994, che risultavano essere i più completi (basso numero di dati mancanti, immagini radar disponibili, durata dell'evento superiore a 3 ore). Queste operazioni di inseminazione selezionate sono attualmente utilizzate al fine di definire il protocollo di analisi congiunta di dati radar e di pioggia.

Qui di seguito si riporta una breve descrizione dei passi salienti dell'analisi esplorativa condotta. Gran parte dei risultati dell'analisi descrittiva sono riportati in Orasi (2004).

Per tutte le analisi condotte è stato necessario sviluppare del software ad hoc, utilizzando alcuni ambienti di programmazione ed analisi statistica: S-Plus, Matlab, Isatis ed R.

2. Controllo della qualità dei dati

La prima fase dell'analisi esplorativa è stata incentrata sul controllo della qualità dei dati disponibili. Infatti è di fondamentale importanza conoscere la reale accuratezza con cui la pioggia è stata rilevata dalla rete CPP dell'UCEA comprensiva di 80 pluviografi dislocati tra Bari e Canosa su di un'area di circa 160 km x 60 km. Ad esempio, problemi dovuti ad un blocco o un malfunzionamento della stazione sono molto difficili da allocare nel tempo; quando viene osservato il blocco di una stazione questo viene eliminato e il fatto segnalato. Se la scala temporale di analisi è più fine degli intervalli di tempo tra un controllo e l'altro, il blocco può creare delle distorsioni nella valutazione dei totali di pioggia registrati in quella stazione, e così pure eventuali altri guasti o errori di misura. E' dunque necessario individuare questi periodi ed errori e contrassegnarli come dati non validi. Uno strumento utile ad individuare tali anomalie è la somma cumulata dei millimetri di pioggia nell'arco di un intero mese. Infatti si suppone che la somma cumulata dei millimetri di pioggia abbia un comportamento simile per pluviografi geograficamente vicini, quindi eventuali anomalie vengono in questo modo messe in evidenza. Al fine di condurre questo tipo di analisi, gli 80 pluviografi sono stati suddivisi in 8 gruppi sulla base della reciproca vicinanza geografica (Fig.1 e Tab.1)

Roma,

Prof.ssa Francesca Gallo

| GRUPPO A | GRUPPO B | GRUPPO C | GRUPPO D | GRUPPO E | GRUPPO F | GRUPPO G | GRUPPO H |
|---|--|---|--|--|---|---|---|
| -Masseria Combattenti (103) -San Lorenzo (104) -Acquarulo (203) -Riscata (204) -Torricelli (303) -Pignatella (304) -Fontanella (402) -Pozzo Marano (403) -Postafara (404) -San Antonio (502) | -Contrada Giardino (105) -Tittadegna (106) -Torrebombini (107) -Profico (205) -Zagaria (206) -Pandolfelli (207) -Cefalicchio (305) -San Pietro (306) -Masseria Cicciarelli (307) -Tozzoli (405) -Campanelli (406) -Piano del Monaco (407) | -Lamadattola (108) -Piscina Michele (109) -Torre d' Aggera (110) -Sant'Elia (208) -Piscina d' Azzella (209) -Torre del Carmine (210) -Pedale (308) -Pilella (309) -La Michelangelo (310) | -Bari Modugno (111) -Ognissanti (112) -Via Rutigliano (113) -Travagliolo (211) -Madonna di Torre (212) -Contrada Russo (213) -Mellito (311) -Zanclone (312) -Chianura Pescariello (411) -Montefreddo (412) | -L'Isola (114) -Polisello (115) -Turi Putignano (214) -Lama d'Inferno (215) -San Vito (313) -Ortensia Nuova (314) -Morea (315) -Parco della Corte (413) -Bellacicco (414) -Pizziferro (415) | -Franceschiello (217) -S. Galera (218) -Gemma (317) -Masseria Lentini (318) -Parco dell' Arciprete (417) -Contrada Saponara (418) -Parco di stalla (515) -Amendolecchia (516) -Mater Grazie (517) | -Parcone (510) -Stasulli (511) -Contrada Matera (512) -Contrada Viglione (513) -Catalano (514) -S. Maria (610) -Canale di Pastinaca (611) -Chiancalata (612) -La Bruna (613) -Panettieri (614) | -Spaventicchio (503) -La Marchesa (504) -Valle Cornuta (505) -S. Lucia (506) -Savuco (507) -Monte Carbone (603) -Sanzanello (604) -Mugnolo (605) -Garramone (606) -Cugni (607) |

Tab. 1 Gruppi di pluviografi

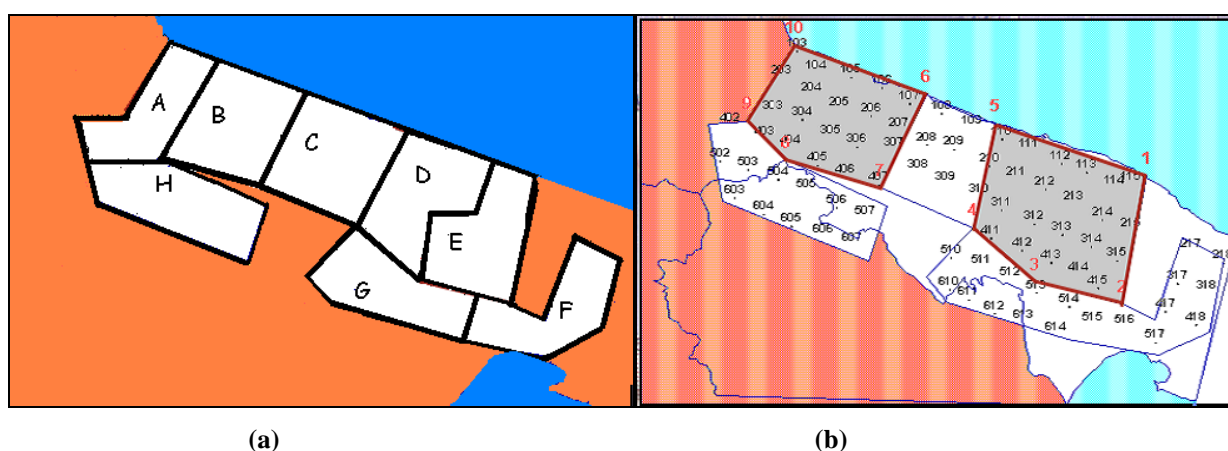


Fig. 1 Suddivisione dei pluviografi negli 8 gruppi (a) e schema della rete CPP (b)

I dati di pioggia, per ciascuno dei mesi considerati e per ciascun gruppo separatamente, sono quindi stati riportati in forma cumulata su opportuni grafici, detti hyetographs, (un esempio è riportato in Fig.2) al fine di evidenziare eventuali comportamenti anomali di una data stazione seguendo quanto suggerito in Wood, Jones e Moore (2000).

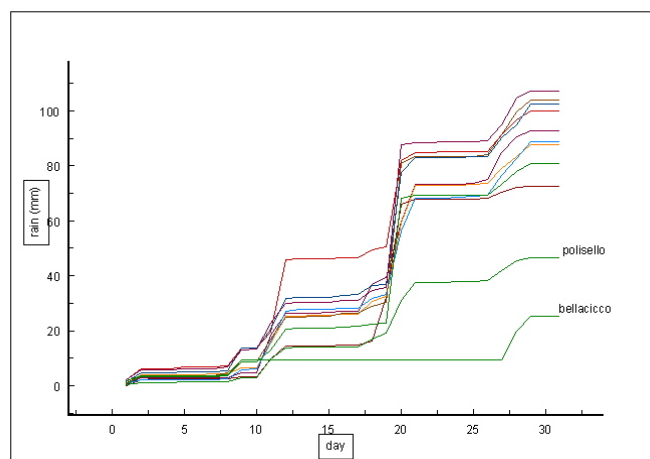


Fig. 2 Valori di pioggia cumulati per il controllo della qualità dei dati: gruppo E Gennaio 1994

Qualora un pluviometro presenti un comportamento anomalo rispetto agli altri e questo non sia spiegabile con altre informazioni sulle condizioni meteorologiche, questo viene eliminato dal gruppo per il mese analizzato. La Fig. 2, ad esempio, mostra il comportamento anomalo dei due pluviografi Polisello e Bellacicco, che sono stati eliminati dalle successive elaborazioni. Il procedimento è stato ripetuto per tutti i 13 mesi in cui è stata effettuata almeno un'operazione di semina nel periodo 1992-1994. Nella Tab. 2 viene riportato il numero dei pluviografi giudicati affidabili per ciascun mese:

| Mese | N° di pluviografi affidabili |
|---------------|------------------------------|
| Aprile 1992 | 44 |
| Ottobre 1992 | 55 |
| Novembre 1992 | 57 |
| Dicembre 1992 | 57 |
| Gennaio 1993 | 50 |
| Febbraio 1993 | 57 |
| Marzo 1993 | 62 |
| Aprile 1993 | 58 |
| Gennaio 1994 | 65 |
| Febbraio 1994 | 62 |
| Marzo 1994 | 42 |
| Aprile 1994 | 59 |
| Maggio 1994 | 58 |

Tab. 2 Numero dei pluviografi con dati ritenuti affidabili

E' da notare come in alcuni casi il numero di pluviografi "validi" ai fini dell'analisi si sia quasi dimezzato.

3. Analisi della variabilità spaziale e temporale

Sempre mantenendo la suddivisione in 8 gruppi illustrata al punto precedente (Tab. 1), per ciascuna coppia di pluviografi in ciascun gruppo si è calcolata la cross-correlazione (con lag temporale pari a zero) utilizzando il totale di pioggia registrato in ciascuna ora di rilevazione. Questa operazione è stata ripetuta per ognuno dei mesi considerati e per ciascuno di questi si è costruita un'opportuna tavola riassuntiva (si veda un esempio relativo ad Aprile 1992 in Tab.3). In generale, si è osservata una correlazione elevata tra i valori di pioggia registrati in pluviografi geograficamente vicini.

Come passo successivo si è proceduto a calcolare la quantità oraria media di pioggia per ciascuno degli otto gruppi e utilizzando tale grandezza si sono calcolate la correlazione media tra i gruppi e la deviazione standard della misura di correlazione. I risultati sono stati poi riportati su opportuni grafici, nei quali in ordinata si riportano la correlazione media ed una banda di confidenza ottenuta aggiungendo e sottraendo la deviazione standard attorno a ciascun valore, mentre in ascissa si riportano i lag spaziali (distanze tra i gruppi). In Fig. 3 riportiamo l'esempio relativo ad Aprile 1992 .

| Gruppo A | acquarulo | fontanella | risicata | s.antonio | sanlorenzo | torricelli | | | | |
|---------------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|------------|----------|----------|--|
| Acquarulo (203) | 1,00 | 0,08 | 0,90 | 0,07 | 0,32 | 0,83 | | | | |
| Fontanella (402) | 0,08 | 1,00 | 0,04 | 0,13 | 0,03 | 0,20 | | | | |
| Risicata (204) | 0,90 | 0,04 | 1,00 | 0,05 | 0,50 | 0,78 | | | | |
| s.antonio (502) | 0,07 | 0,13 | 0,05 | 1,00 | 0,03 | 0,12 | | | | |
| Sanlorenzo (104) | 0,32 | 0,03 | 0,50 | 0,03 | 1,00 | 0,16 | | | | |
| Torricelli (303) | 0,83 | 0,20 | 0,78 | 0,12 | 0,16 | 1,00 | | | | |
| Gruppo B | cefalicchio | contradag. | pandolfelli | pianodelm. | profico | s.pietro | zagaria | | | |
| Cefalicchio (305) | 1,00 | 0,16 | 0,22 | 0,28 | 0,33 | 0,79 | 0,40 | | | |
| Contradagiardino (105) | 0,16 | 1,00 | 0,33 | 0,14 | 0,32 | 0,10 | 0,49 | | | |
| Pandolfelli (207) | 0,22 | 0,33 | 1,00 | 0,30 | 0,44 | 0,31 | 0,74 | | | |
| Pianodelmonaco (407) | 0,28 | 0,14 | 0,30 | 1,00 | 0,13 | 0,30 | 0,30 | | | |
| Profico (205) | 0,33 | 0,32 | 0,44 | 0,13 | 1,00 | 0,31 | 0,63 | | | |
| s.pietro (306) | 0,79 | 0,10 | 0,31 | 0,30 | 0,31 | 1,00 | 0,36 | | | |
| Zagara (206) | 0,40 | 0,49 | 0,74 | 0,30 | 0,63 | 0,36 | 1,00 | | | |
| Gruppo C | lamadatt. | lamichel. | pedale | piscinamic. | torredag. | | | | | |
| Lamadattola (108) | 1,00 | 0,57 | 0,55 | 0,60 | 0,47 | | | | | |
| Lamichelangelo (310) | 0,57 | 1,00 | 0,61 | 0,55 | 0,41 | | | | | |
| Pedale (308) | 0,55 | 0,61 | 1,00 | 0,43 | 0,29 | | | | | |
| Piscinamichele (109) | 0,60 | 0,55 | 0,43 | 1,00 | 0,49 | | | | | |
| Torredaggera (110) | 0,47 | 0,41 | 0,29 | 0,49 | 1,00 | | | | | |
| Gruppo D | barimod. | chianurapesc. | contradar. | mellitto | montefr. | travagliolo | viarutigl. | zanclone | | |
| Barimodugno (111) | 1,00 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,07 | 0,12 | 0,03 | 0,14 | | |
| Chianurapescariello (411) | 0,05 | 1,00 | 0,16 | 0,35 | 0,88 | 0,63 | 0,07 | 0,53 | | |
| Contradarusso (213) | 0,03 | 0,16 | 1,00 | 0,08 | 0,20 | 0,21 | 0,03 | 0,21 | | |
| Mellitto (311) | 0,03 | 0,35 | 0,08 | 1,00 | 0,35 | 0,33 | 0,04 | 0,30 | | |
| Montefreddo (412) | 0,07 | 0,88 | 0,20 | 0,35 | 1,00 | 0,63 | 0,09 | 0,60 | | |
| Travagliolo (211) | 0,12 | 0,63 | 0,21 | 0,33 | 0,63 | 1,00 | 0,11 | 0,77 | | |
| Viarutigliano (113) | 0,03 | 0,07 | 0,03 | 0,04 | 0,09 | 0,11 | 1,00 | 0,10 | | |
| Zanclone (312) | 0,14 | 0,53 | 0,21 | 0,30 | 0,60 | 0,77 | 0,10 | 1,00 | | |
| Gruppo E | bellacicco | lamad.inf. | morea | ortensian. | parcodell. | polisello | sanvito | | | |
| Bellacicco (414) | 1,00 | 0,38 | 0,62 | 0,87 | 0,88 | 0,25 | 0,79 | | | |
| lamad.inferno (215) | 0,38 | 1,00 | 0,65 | 0,53 | 0,47 | 0,50 | 0,64 | | | |
| Morea (315) | 0,62 | 0,65 | 1,00 | 0,68 | 0,54 | 0,26 | 0,60 | | | |
| Ortensianuova (314) | 0,87 | 0,53 | 0,68 | 1,00 | 0,77 | 0,34 | 0,79 | | | |
| Parcodellacorte (413) | 0,88 | 0,47 | 0,54 | 0,77 | 1,00 | 0,31 | 0,82 | | | |
| Polisello (115) | 0,25 | 0,50 | 0,26 | 0,34 | 0,31 | 1,00 | 0,43 | | | |
| Sancito (313) | 0,79 | 0,64 | 0,60 | 0,79 | 0,82 | 0,43 | 1,00 | | | |
| Gruppo F | amendolecc. | contradas. | francesc. | masserial. | matergr. | parcodist. | s.galara | | | |
| Amendolecchia (516) | 1,00 | 0,41 | 0,15 | 0,06 | 0,58 | 0,71 | 0,15 | | | |
| Contradasaponara (418) | 0,41 | 1,00 | 0,38 | 0,15 | 0,40 | 0,26 | 0,35 | | | |
| Franceschiello (217) | 0,15 | 0,38 | 1,00 | 0,21 | 0,06 | 0,16 | 0,64 | | | |
| Masserialentini (318) | 0,06 | 0,15 | 0,21 | 1,00 | 0,05 | 0,04 | 0,21 | | | |
| Matergrazie (517) | 0,58 | 0,40 | 0,06 | 0,05 | 1,00 | 0,39 | 0,08 | | | |
| Parcodistalla (515) | 0,71 | 0,26 | 0,16 | 0,04 | 0,39 | 1,00 | 0,14 | | | |
| s.galera (218) | 0,15 | 0,35 | 0,64 | 0,21 | 0,08 | 0,14 | 1,00 | | | |
| Gruppo G | canaledip. | catalano | chiancal. | contradam. | contradavigl. | labruna | panettieri | parcone | Stasulli | |
| Canaledipastinaca (611) | 1,00 | 0,43 | 0,28 | 0,59 | 0,20 | 0,13 | 0,18 | 0,74 | 0,40 | |
| Catalano (514) | 0,43 | 1,00 | 0,24 | 0,77 | 0,46 | 0,22 | 0,29 | 0,57 | 0,30 | |
| Chiancalata (612) | 0,28 | 0,24 | 1,00 | 0,44 | 0,12 | 0,87 | 0,34 | 0,20 | 0,66 | |
| Contradamatera (512) | 0,59 | 0,77 | 0,44 | 1,00 | 0,55 | 0,37 | 0,29 | 0,62 | 0,60 | |
| Contradaviglione (513) | 0,20 | 0,46 | 0,12 | 0,55 | 1,00 | 0,35 | 0,43 | 0,30 | 0,19 | |
| La bruna (613) | 0,13 | 0,22 | 0,87 | 0,37 | 0,35 | 1,00 | 0,54 | 0,09 | 0,47 | |
| Panettieri (614) | 0,18 | 0,29 | 0,34 | 0,29 | 0,43 | 0,54 | 1,00 | 0,16 | 0,09 | |
| Parcone (510) | 0,74 | 0,57 | 0,20 | 0,62 | 0,30 | 0,09 | 0,16 | 1,00 | 0,37 | |
| Stasulli (511) | 0,40 | 0,30 | 0,66 | 0,60 | 0,19 | 0,47 | 0,09 | 0,37 | 1,00 | |
| Gruppo H | garramone | mugnolo | s.lucia | sanzanello | savuco | spaventic. | vallecorn. | | | |
| Garramone (606) | 1,00 | 0,23 | 0,24 | 0,04 | 0,34 | 0,12 | 0,18 | | | |
| Mugnolo (605) | 0,23 | 1,00 | 0,18 | 0,30 | 0,57 | 0,15 | 0,79 | | | |
| s.lucia (506) | 0,24 | 0,18 | 1,00 | 0,06 | 0,30 | 0,06 | 0,19 | | | |
| Sanzanello (604) | 0,04 | 0,30 | 0,06 | 1,00 | 0,09 | 0,08 | 0,15 | | | |
| Savuco (507) | 0,34 | 0,57 | 0,30 | 0,09 | 1,00 | 0,19 | 0,73 | | | |
| Spaventacchio (503) | 0,12 | 0,15 | 0,06 | 0,08 | 0,19 | 1,00 | 0,10 | | | |
| Vallecornuta (505) | 0,18 | 0,79 | 0,19 | 0,15 | 0,73 | 0,10 | 1,00 | | | |

Tab. 3 Correlazione all'interno dei gruppi - Aprile 1992

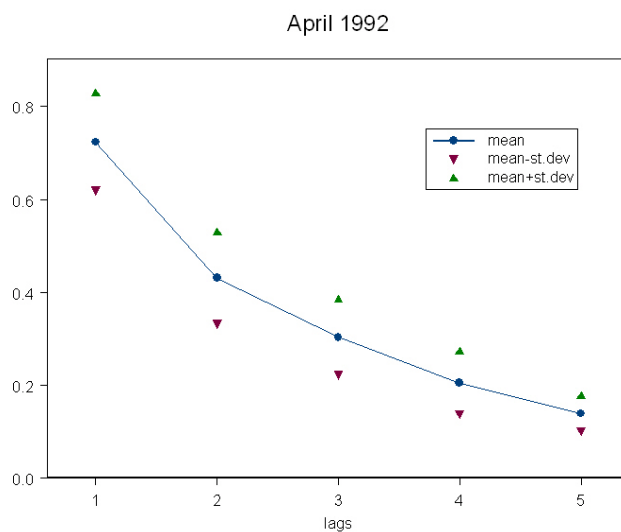


Fig. 3 Grafico delle *cross-correlazioni spaziali* tra i pluviografi della rete CPP, al variare della distanza tra i gruppi per il mese di Aprile 1992

Dai grafici è evidente il decrescere dell'associazione spaziale al crescere della distanza tra i gruppi di pluviografi, inoltre si evidenzia una più elevata deviazione standard in corrispondenza di piccoli valori della distanza dovuta al maggior numero di pluviografi che concorrono alla formazione del valore di correlazione.

L'analisi fin qui descritta permette di affermare che la variabilità spaziale del fenomeno è piuttosto regolare, ciò consente di condurre analisi efficaci e corrette da un punto di vista statistico. Inoltre è possibile affermare che, risultando l'intera area piuttosto omogenea da questo punto di vista, è possibile e corretto mantenere la distinzione tra area Bersaglio ed area Controllo nelle analisi successive.

L'associazione temporale per ogni gruppo di pluviografi, è stata studiata calcolando la funzione di autocorrelazione utilizzando ancora la quantità oraria media di pioggia per ciascuno degli otto gruppi e riportando il risultato per ognuno dei mesi considerati in opportuno grafico. In Fig. 4, riportiamo i risultati per Aprile 1992.

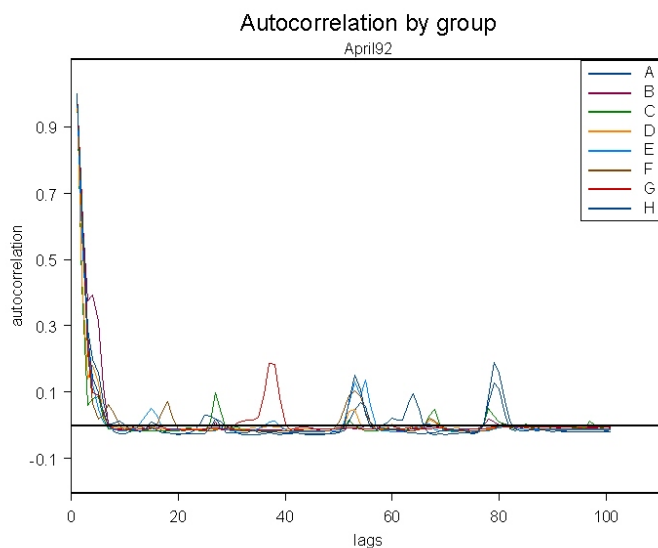


Fig. 4 Autocorrelazione temporale della quantità oraria media di pioggia per ciascuno degli otto gruppi di pluviografi della rete CPP, Aprile 1992

Le funzioni di autocorrelazione temporale sono state stimate anche all'interno di ciascun gruppo, usando ancora dati orari; ad esempio, in Fig. 5, si riportano le funzioni di autocorrelazione ottenute per i pluviografi inclusi nel Gruppo A durante il mese di Aprile 1992.

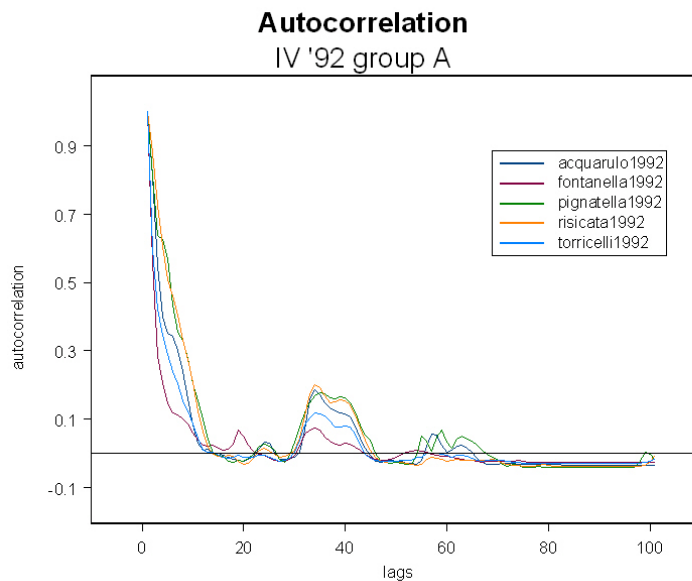


Fig. 5 Funzioni di autocorrelazione temporale calcolate per i pluviografi del gruppo A; Aprile 1992.

All'interno di ogni gruppo il comportamento osservato è piuttosto omogeneo, non così si può affermare quando si passa a confrontare le funzioni di autocorrelazione temporale in gruppi diversi e passando da un mese all'altro. Ciò ci porta ad affermare che:

1. le differenze nell'associazione temporale osservate tra i vari gruppi sono da imputarsi alla presenza di variabilità spaziale, che seppur "regolare", in senso statistico, dà ragione di dette differenze;
2. le differenze nell'associazione temporale osservate al variare dei mesi, anche considerando lo stesso gruppo di pluviografi, sono dovute sia al fatto che da un mese all'altro il numero dei pluviografi considerati validi cambia, sia al fatto che ciascun mese dell'anno presenta caratteristiche di piovosità peculiari.

Una prima conclusione che è possibile trarre a questo punto è che ciascun mese in cui si è avuto un episodio di semina va analizzato separatamente. Inoltre è già possibile immaginare che si renderà necessario analizzare ogni evento di semina separatamente dagli altri. Quest'ultima affermazione è poi convalidata dalla successiva analisi variografica specifica della variabilità spaziale.

4. Analisi esplorativa spaziale basata sul variogramma

Al fine di precisare ulteriormente il tipo di analisi statistica da condurre sugli eventi di semina si è proceduto ad analizzare ciascuno dei mesi considerati secondo il seguente protocollo:

- Per ciascun mese si è provveduto ad isolare i valori orari non nulli registrati in ciascun pluviografo valido;
- quindi si sono separate tra loro le sequenze di ore per le quali è piovuto continuativamente in almeno uno dei pluviografi validi;
- per ciascuna sequenza si è provveduto a stimare tre diverse quantità:
 - la quantità totale di pioggia caduta,
 - il variogramma per ogni ora della sequenza e la media degli stessi per ciascuna sequenza,
 - il variogramma del totale di pioggia caduta;
- inoltre si è calcolato il variogramma empirico per la media oraria mensile dell'ammontare di pioggia (un esempio è riportato in Fig. 6).

Riportando su grafici (di cui si riporta un esempio in Fig. 7) i risultati dell'analisi variografica si è potuto confermare l'ipotesi che fosse necessario elaborare ogni evento di semina separatamente. Infatti le diverse sequenze presentano una variabilità spaziale assai diversa tra loro. In particolare si osserva che, quando la quantità di pioggia caduta è scarsa, la variabilità spaziale diviene molto irregolare (non stazionaria) e ciò porta a scartare tali periodi ai fini di un'analisi completa.

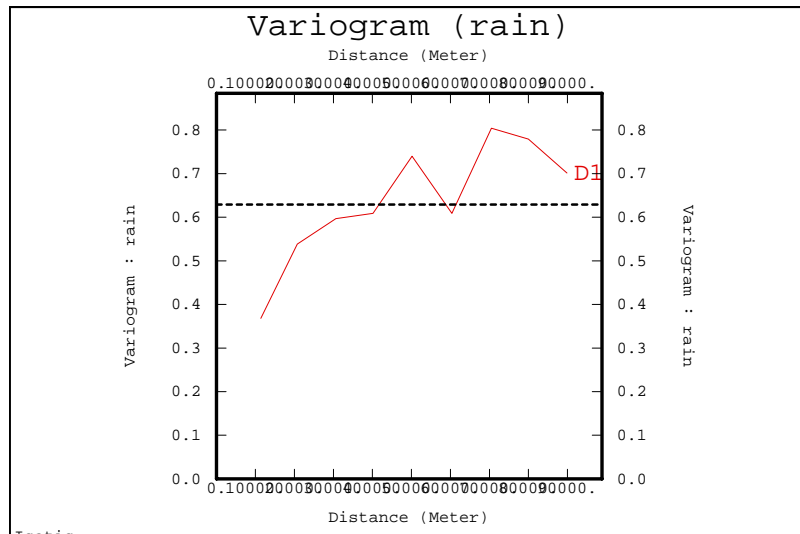


Fig. 6 Variogramma empirico della media oraria mensile della quantità di pioggia (Aprile 1992)

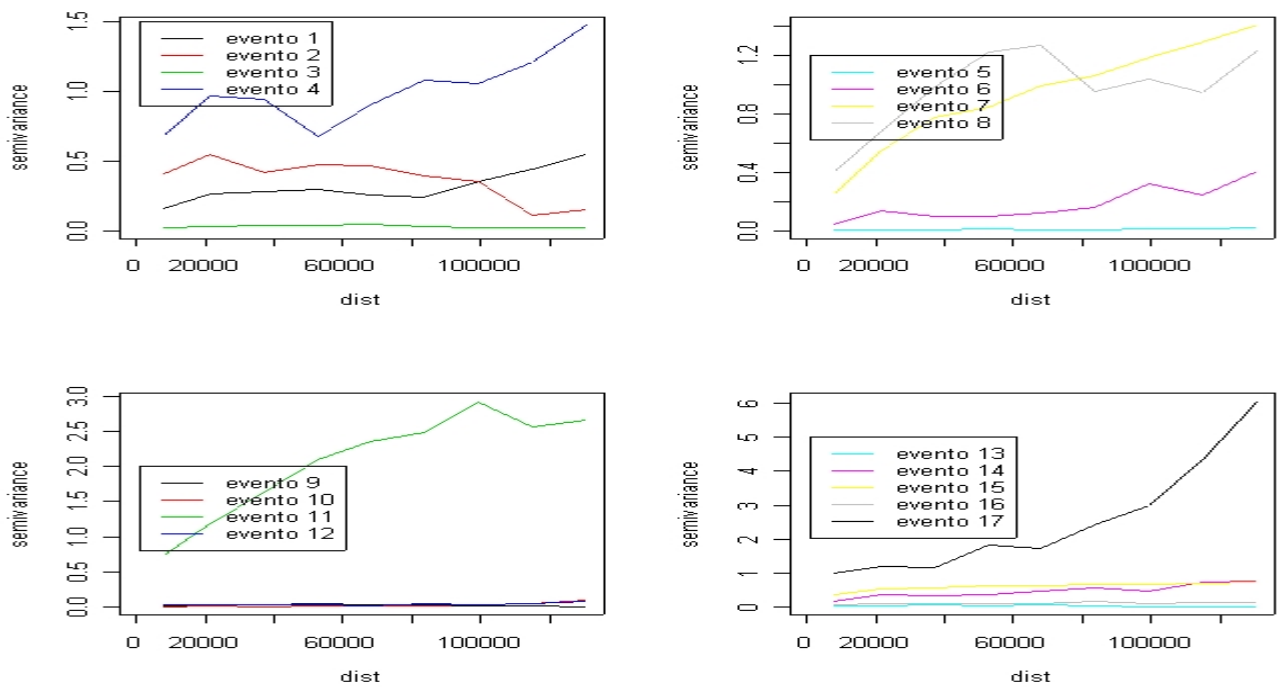


Fig. 7 Variogrammi di alcune sequenze di pioggia (Aprile 1992)

Il calcolo dei variogrammi delle medie orarie mensili (Fig. 6) ha invece riconfermato la regolarità della variabilità spaziale quando il numero di misure nulle è esiguo.

5. L'uso delle immagini radar

Nel 1992 nell'esperimento è stato introdotto un radar meteorologico digitale C-band e l'area coperta da tale radar, collocato all'interno dell'aeroporto di Bari Palese, in cui è compresa l'area su cui è stato condotto l'esperimento, è di circa 200 km². Il sistema che prevede l'utilizzo di un radar per ricostruire campi di pioggia è in notevole aumento poiché tale strumento permette di ottenere immagini di precipitazioni spazialmente continue per brevi e regolari intervalli temporali. D'altro canto, una rete di pluviografi di rilevazione collocata presso un insieme di siti permette di fornire stime più dirette e accurate dell'intensità di pioggia all'interno dell'area di studio. Tuttavia la copertura dell'area di studio fornita da tali pluviometri è spazialmente sparsa rispetto alla griglia sulla quale è misurata la riflettività radar. La calibrazione dei dati di riflettività del radar attraverso pluviometri collocati a terra permette di ottenere stime di intensità di pioggia su un'area più vasta rispetto a quella coperta dalla rete pluviometrica. Tale tecnica di calibrazione è stata largamente utilizzata e in letteratura si possono trovare utili riferimenti nei lavori di Austin (1987), Chiach and Krajewski (1999), Collinge et al. (1993), Legates (2000), Matsoukas et al. (1999), Wood et al. (2000).

I valori di riflettività, che si riferiscono ad un pixel di 0.5 km x 0.5 km, sono espressi in dBZ. Questa è una misura del potere restituito al radar dalle particelle di precipitazione nell'atmosfera. Questa misura può essere convertita in intensità di pioggia, sfruttando una relazione empirica esistente tra riflettività e dimensione delle gocce di pioggia. Un'analisi congiunta dei dati di pioggia e delle rilevazioni radar è stata condotta in Orasi (2004) al fine di mettere in parallelo le osservazioni radar con le rilevazioni a terra dei pluviometri UCEA. In particolare sono stati analizzati sei episodi di semina, due per ciascuno degli anni dal 1992 al 1994, che risultavano essere i più completi (basso numero di dati mancanti, immagini radar disponibili, durata delle operazioni di semina superiore a 3 ore).

| | Day of event | Starting time | Ending time |
|---|--------------------|---------------|-------------|
| 1 | 14 February 1994 | 4am | 6:20pm |
| 2 | 18 January 1994 B | 10am | 2:30pm |
| 3 | 18 January 1994 A | 2:40am | 7:50am |
| 4 | 28 February 1993 B | 10pm | 1:20am |
| 5 | 28 February 1993 A | 9:20am | 3pm |
| 6 | 1 March 1993 | 2pm | 10:30pm |
| 7 | 31 December 1992 A | 1:00 am | 5:40am |
| 8 | 31 December 1992 A | 11am | 4:40pm |
| 9 | 11 April 1992 | 5:00am | 3:30pm |

Tab. 4 Episodi di semina selezionati

In Tab.4 vengono riportati gli episodi di semina selezionati: nella prima colonna viene indicato il giorno in cui è avvenuta la semina mentre nella seconda e terza colonna l'inizio e la fine dell'intervallo temporale considerato.

Per giungere a questo confronto è stato necessario trasformare le immagini radar disponibili in matrici di valori numerici georeferenziati, quindi si è provveduto a scegliere il tipo di allineamento temporale ottimale tra i dati a terra e i valori radar. Tale passo si è reso necessario per poter verificare la possibilità di utilizzare le immagini radar registrate simultaneamente alle rilevazioni dei pluviometri; infatti, se si fosse riscontrato un "effetto ritardo" tra radar e pluviografi a terra se ne sarebbe dovuto tener conto nell'analisi. La scelta dell'uso delle immagini simultanee rispetto alle rilevazioni a terra è stata confermata. In seguito, si è provveduto a convertire in pioggia i valori di riflettività a nostra disposizione seguendo quanto usualmente viene applicato negli studi meteorologici.

In essi si procede ad applicare una relazione di conversione, nota come *relazione di Marshall-Palmer*:

$$Z = a R^b$$

in cui Z è il valore di riflettività (espresso in mm^{-6}m), R è la quantità di pioggia corrispondente (in mmh), mentre a e b sono due coefficienti incogniti. Usualmente questi due ultimi valori sono posti pari a: $a=200$, $b=1.6$. Al fine di perfezionare la conversione, viene calcolato un fattore di correzione detto *calibration factor* e definito come:

$$CF = \frac{\text{gauge rainfall}}{\text{radar rainfall}} = \frac{R_g}{R_r}$$

L'errore viene valutato come:

$$CF_q = \frac{\sum_{i=1}^n (R_g)_i}{\sum_{i=1}^n (R_r)_i}$$

dove n è il numero dei pluviografi coinvolti nel procedimento di calibrazione. Chiaramente viene calcolato un diverso fattore per ciascun istante di tempo, tali valori vengono poi sintetizzati tramite una media sui tempi. Un esempio di correzione effettuata con tale procedura è riportato in Fig. 8 dove ci si riferisce all'evento di semina dell'11 Aprile 1992. Tale evento copre un intervallo temporale che inizia alle 5:10 a.m. e termina alle 3:30 p.m. e al suo interno è compresa la durata di due operazioni di semina più le tre ore successive.

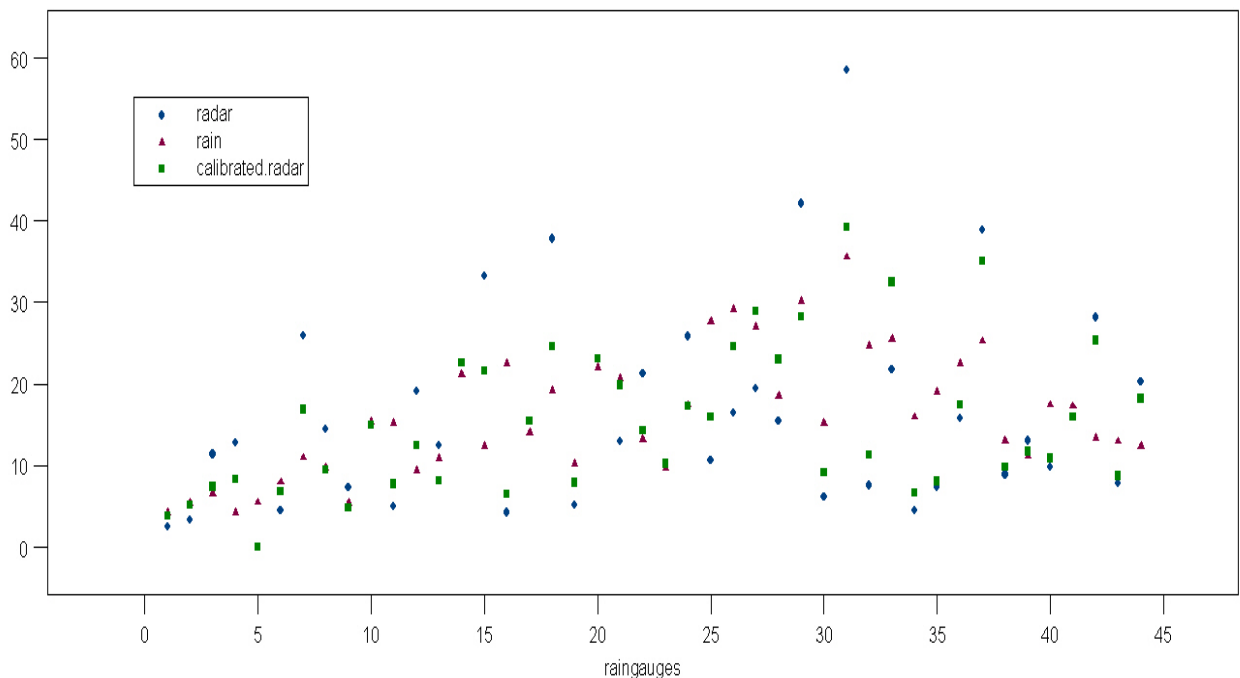


Fig. 8 Dato pluviometrico, dato radar e dato radar calibrato, presso ciascun sito, per l'evento dell'11 Aprile 1992.

Diversi problemi sorgono dall'uso di questa semplice procedura. Bisogna per prima cosa sottolineare il fatto che la precisione delle misure radar diminuisce all'aumentare della distanza dallo strumento

(*attenuazione*). Inoltre, qualora il radar registrasse precipitazioni nulle il fattore di calibrazione non risulterebbe definito e, non ultimo, la sintesi dei valori stimati per mezzo di una media temporale fa sì che il fattore di correzione perda “memoria dinamica” e non sia quindi in grado di cogliere eventuali variazioni della relazione tra radar e pluviografi a terra nel corso degli eventi analizzati. Infine, si pone il problema di come estendere i valori del *calibration factor* ottenuti in corrispondenza dei diversi pluviografi, a quelle parti dell’area oggetto di studio in cui non sono presenti pluviografi. Quest’ultimo problema richiederebbe la stima di detto fattore attraverso delle tecniche di spazializzazione, ad esempio tramite un approccio kriging, che comporterebbe l’introduzione di un ulteriore elemento di approssimazione. Pertanto si ritiene più opportuno seguire un approccio di tipo modellistico alla calibrazione del dato radar attraverso le misure di pioggia dei pluviografi a terra. A tal fine si stanno sperimentando diversi approcci. Il primo trae ispirazione da una trattazione specificatamente geostatistica, nota come kriging con deriva esterna, (Wackernagel (1995)) nella quale si fa uso della riflettività radar convertita in intensità di pioggia per stimare il campo di pioggia su di un’area di dimensioni superiori rispetto a quella coperta dalla rete CPP dell’UCEA.

6. Conclusioni e sviluppi successivi

Uno degli obiettivi principali di questo progetto di ricerca è quello di fornire un supporto alla fase di valutazione della parte sperimentale del Progetto Pioggia condotto in Italia dal 1986 al 1994 e più in particolare è quello di riuscire a costruire i campi di pioggia combinando due fonti di dati: intensità di pioggia registrata dai pluviometri UCEA e la riflettività radar. Altre variabili esplicative, come velocità e direzione del vento, pressione atmosferica e temperature massime e minime, seppur disponibili, sono state escluse dalle successive analisi a causa della differente risoluzione spaziale e temporale alla quale esse erano disponibili.

I dati registrati dai pluviometri UCEA e i dati di riflettività radar sono stati sottoposti ad un approfondito controllo della qualità dei dati al fine di rimuovere eventuali anomalie e dati anomali. Questo controllo ha permesso da una parte di coinvolgere nell'analisi solamente i dati di quei pluviografi che sono risultati validi, dall'altra ha ridotto drasticamente il numero dei siti pluviometrici effettivamente disponibili.

Successivamente sono state condotte numerose analisi esplorative basilari per esplorare l'andamento del processo di pioggia e per indirizzare lo sviluppo dei modelli statistici. Questo tipo di analisi ha permesso di evidenziare periodi piovosi o siccitosi e, in particolare, ha enfatizzato l'aspetto estremamente "secco" dell'area di studio analizzata.

La struttura spaziale e temporale è stata oggetto delle successive analisi, condotte su apposite "finestre" spaziali e temporali. Gli strumenti di analisi utilizzati sono stati appunto le cross-correlazioni, variogrammi, funzioni di autocorrelazione ecc. L'analisi ha evidenziato un aspetto fortemente erratico del processo. In particolare, l'andamento delle precipitazioni è spazialmente omogeneo ma cambia considerevolmente da mese a mese. Questo fatto induce a trattare ciascun evento di interesse separatamente.

L'introduzione del radar meteorologico digitale, che monitora l'area ogni cinque minuti, ha permesso di aggiungere un nuovo elemento di indagine nel processo di valutazione, poiché introduce un'informazione sull'intensità di pioggia su un'area più vasta di quella coperta dalla rete CPP UCEA. Tuttavia il dato radar è affetto da errori e necessita di un processo di calibrazione. Le proposte operative di calibrazione presentate difettano in più punti e si è reso necessario prendere in considerazione degli approcci alla calibrazione tramite modelli statistici che tenessero congiuntamente in considerazione le caratteristiche temporali e spaziali del processo oggetto di studio.

Il passo successivo, che sarà oggetto del terzo anno di attività, è quello dunque di costruire un modello statistico che permetta di calibrare e trasformare correttamente in indici di pioggia i valori di riflettività registrati dal radar anche al di fuori dell'area sperimentale. Tale modello darà la possibilità di fornire una stima della precisione con la quale tale conversione verrà effettuata.

Riferimenti Bibliografici Essenziali

- Collinge V.K., Young P.C. (1993), *Weather radar calibration: Systems Approach*, Concise Encyclopedia of Environmental Systems, Oxford; Pergamon, ed. P.C. Young, pg 706-710.
- Collinge V.K., (1993), *Weather radar for rainfall measurement and forecasting*, Concise Encyclopedia of Environmental Systems, Oxford; Pergamon, ed. P.C. Young, pg 710-714.
- Krajewski W.F. (1997), *Rainfall estimation using weather radar and ground stations*, URL: www.unesco.org/phi/libros/radar/art04.html
- Orasi, A. (2004) *Reconstruction of rainfall fields by spatio-temporal models for the analysis of a rain enhancement experiment in southern Italy*, Phd Thesis Università di Bologna (available in English)
- Wood S.J., Jones D.A., Moore R.J, (2000) *Accuracy of rainfall measurement for scales of hydrological interest*, Hydrology and Earth System Sciences, 4(4), 531-543.
- Wackernagel, H. (1995) *Multivariate Geostatistics*. Springer-Verlag.
- Austin, P.M. (1987) *Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall.*, Mon. Wea. Rev., 15, 1053-1070.
- Ciach, J. G. and Krajewski, W.F. (1999) *Radar-raingauge comparison under observational uncertainties*, J. Appl. Meteor., 38, 1519--1525.
- Legates, D.R. (2000) *Real-time calibration of radar precipitation estimates*, Professional Geographer, 52, 235—246.
- Matsoukas, C. Islam, S. and Kothari, R.(1999) *Fusion of radar and raingauge measurements for an accurate estimation of rainfall*, J. of Geophysics Res., 104, 31437—31450.
- Wood, S.J. Jones, D.A. and Moore, R.J., (2000) *Static and dynamic calibration of radar data for hydrological use*, Hydrology and Earth System Sciences, 4(4), 545—554.