

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**  
**SEDE DI BOLOGNA**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE**

**TESI DI LAUREA**

in

Costruzioni idrauliche e protezione idraulica del territorio LS

**IDENTIFICAZIONE DELLA RELAZIONE TRA RIFLETTIVITÀ  
RADAR E INTENSITÀ DI PRECIPITAZIONE: APPLICAZIONE AD  
EVENTI INTENSI REGISTRATI SULLA REGIONE PIEMONTE**

**CANDIDATO**

Carlo Bartolini

**RELATORE**

Prof. ing. Armando Brath

**CORRELATORI**

Prof.ssa ing. Elena Toth

Prof.ssa ing. Paola Allamano

Anno Accademico 2009-2010

Sessione II



# 1 INDICE

<b>1</b>	<b>INDICE</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>INDICE DELLE TABELLE</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>SPIEGAZIONE FISICA DEGLI EVENTI METEOROLOGICI DI INTERESSE</b> .....	<b>9</b>
5.1	EVENTI DI TIPO CONVETTIVO .....	9
5.2	EVENTI DI TIPO STRATIFORME.....	12
<b>6</b>	<b>REGISTRAZIONE DEI DATI PLUVIOMETRICI</b> .....	<b>14</b>
6.1	PLUVIOGRAFO .....	14
6.1.1	<i>FUNZIONAMENTO DEL PLUVIOGRAFO A BASCULA</i> .....	14
6.1.2	<i>PROBLEMI INERENTI I PLUVIOGRAFI</i> .....	16
6.2	RETE METEORIDROGRAFICA PIEMONTESE .....	17
<b>7</b>	<b>LA RELAZIONE Z/R</b> .....	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>RADAR METEOROLOGICO</b> .....	<b>23</b>
8.1	RAGGIO D'AZIONE DEL RADAR.....	23
8.2	PROBLEMI INERENTI I RADAR METEOROLOGICI .....	24
8.2.1	<i>ATTENUAZIONE</i> .....	24
8.2.2	<i>RIFLESSIONE ANOMALA</i> .....	26
8.2.3	<i>OGGETTI INDESIDERATI</i> .....	26
8.3	POTENZA E RIFLETTIVITÀ.....	26
8.4	INDIVIDUAZIONE DEL BERSAGLIO, CAMPI Z & R NELLO SPAZIO, CAMPO R SULLA SUPERFICIE TERRESTRE .....	28
8.5	RADAR DI ARPA PIEMONTE .....	29
<b>9</b>	<b>EVENTI ANALIZZATI</b> .....	<b>32</b>
9.1	ATTIVITÀ DI RACCOLTA DATI PRESSO ARPA PIEMONTE E FORMATO DEI DATI .....	32
9.2	SCELTA DEGLI EVENTI .....	34
<b>10</b>	<b>METODOLOGIA DI ANALISI</b> .....	<b>35</b>
10.1	EVENTI CONVETTIVI .....	35
10.1.1	<i>FORMULA DI JOSS E WALDVOGUEL (1970)</i> .....	35
10.1.2	<i>REGRESSIONE LINEARE</i> .....	35

10.1.3	MINIMIZZAZIONE DELL'ERRORE QUADRATICO MEDIO (EQM).....	38
10.2	EVENTI STRATIFORMI .....	38
<b>11</b>	<b>RISULTATI .....</b>	<b>41</b>
11.1	CONSIDERAZIONI SULLA REGRESSIONE LINEARE.....	43
11.2	DETERMINAZIONE DELLA FINESTRA TEMPORALE OTTIMALE .....	44
11.2.1	CRITERIO DI SCELTA .....	45
11.2.2	VERIFICA DELLA COPPIA $a$ - $b$ TROVATA.....	46
<b>12</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>48</b>
<b>13</b>	<b>ALLEGATI .....</b>	<b>51</b>
13.1	ANAGRAFICA DELLE STAZIONI .....	51
13.2	ESEMPIO DI OUTPUT DEL GIS .....	61
13.3	CONFRONTO GRAFICO TRA I RISULTATI OTTENUTI CON LA FORMULA DI JOSS E WALDVOGUEL E QUELLI DELLA COPPIA $a=198.19$ , $b=1.69$ DETERMINATA CON IL PROCESSO DI OTTIMIZZAZIONE NON-LINEARE .....	65
<b>14</b>	<b>FONTI .....</b>	<b>71</b>
<b>15</b>	<b>RINGRAZIAMENTI .....</b>	<b>72</b>

## 2 INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1-Esempi di formule Z/R a variare del tipo di precipitazione .....	22
Tab. 2- Eventi di tipo convettivo reperiti presso ARPA Piemonte.....	32
Tab. 3- Eventi di tipo stratiforme reperiti presso ARPA Piemonte .....	32
Tab. 4-Eventi di tipo convettivo analizzati.....	34
Tab. 5- Eventi di tipo stratiforme analizzati.....	34
Tab. 6-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la formula di Joss e Waldvogel con il filtro di media mobile di 10 minuti.....	41
Tab. 7-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la regressione lineare con il filtro di media mobile di 10 minuti	41
Tab. 8-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con il processo di ottimizzazione non-lineare con il filtro di media mobile di 10 minuti .....	42
Tab. 9-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la formula di Joss e Waldvogel con il filtro di media mobile di 30 minuti.....	42
Tab. 10-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la regressione lineare con il filtro di media mobile di 30 minuti	42
Tab. 11-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con il processo di ottimizzazione non-lineare con il filtro di media mobile di 30 minuti .....	42
Tab. 12- Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la formula di Joss e Waldvogel con il filtro di media mobile di 60 minuti.....	43
Tab. 13-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la regressione lineare con il filtro di media mobile di 60 minuti	43
Tab. 14- Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con il processo di ottimizzazione non-lineare con il filtro di media mobile di 60 minuti .....	43
Tab. 15-Coppie a-b determinate con il processo di ottimizzazione non- lineare su tutti gli eventi .....	45

Tab. 16-Verifica di $a=198.18$ , $b=1.69$ per il filtro di 10 minuti su tutti gli eventi .....	47
Tab. 17-Verifica di $a=198.18$ , $b=1.69$ per il filtro di 30 minuti su tutti gli eventi .....	47
Tab. 18-Verifica di $a=198.18$ , $b=1.69$ per il filtro di 60 minuti su tutti gli eventi .....	47
Tab. 19-Anagrafica delle stazioni .....	51
Tab. 20-Esempio di output del Gis .....	61

### 3 INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1-Rappresentazione di correnti termiche .....	10
Fig. 2-Condizioni di instabilità evidenziate dai moti convettivi interni al cumulonembo .....	10
Fig. 3-Correnti agenti in un temporale che si muove da sinistra verso destra .....	11
Fig. 4-Nubi stratiformi.....	13
Fig. 5-Stazione vista dall'esterno .....	15
Fig. 6-Bascula .....	15
Fig. 7-Striscia di carta millimetrata.....	16
Fig. 8-Rete meteoidrografica di Piemonte, Valle d'Aosta e Liguria .....	19
Fig. 9-Stazione meteorologica di Monte Malanotte.....	19
Fig. 10-Stazione idrometrica Stura di Lanzo .....	20
Fig. 11-Principio di funzionamento del radar .....	24
Fig. 12-Campo <i>R</i> delle precipitazioni .....	29
Fig. 13-Radar di Bric della Croce.....	31
Fig. 14-Raggi d'azione dei 2 radar.....	31
Fig. 15-Esempio di regressione lineare .....	44
Fig. 16-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio al variare della finestra temporale mobile.....	46
Fig. 19-Evento 20050802 .....	65
Fig. 20-Evento 20050820 .....	66
Fig. 21-Evento 20060706 .....	67
Fig. 22-Evento 20080529 .....	68
Fig. 24-Evento 20060914-20060915 .....	69
Fig. 25-Evento 20070501-20070504 .....	70





## 4 INTRODUZIONE

In questo capitolo introduttivo si vuole illustrare lo scopo della tesi, che concerne la stima post-evento di precipitazione da radar mediante validazione con dati provenienti dalla rete pluviometrica piemontese.

La tesi s'inserisce nel contesto di progetto tra *ARPA Piemonte (area delle attività regionali per l'indirizzo e il coordinamento in materia di previsione e monitoraggio ambientale)* ed il *Politecnico di Torino (dipartimento di Idraulica, trasporti e infrastrutture civili)* per attività di collaborazione scientifica nell'ambito del progetto *FLORA, Obiettivo Cooperazione territoriale europea Italia-Svizzera 2007-2013..*

Noti il campo spaziale di riflettività  $Z$  [ $mm^3$ ], che è una misura della potenza del segnale di ritorno verso il radar che l'aveva emesso<sup>1</sup> e le misure pluviometriche delle stazioni piemontesi (che sono più di 300), la metodologia proposta consiste nello stimare una relazione di potenza del tipo

**Formula 1**

$$Z=aR^b$$

applicabile all'intera Regione. Con tale fine si determineranno i coefficienti  $a$  e  $b$  in modo che sia possibile valutare il campo di precipitazione areale  $R$  [ $mm^3/h$ ]. I risultati verranno confrontati con quelli derivanti dall'attuale formula utilizzata da *ARPA Piemonte*:

**Formula 2**

$$Z=300R^{1.5}$$

*(Joss e Waldvogel, 1970)<sup>2</sup>*

*Torino, Aosta e Bologna, dal 1 maggio al 18 ottobre 2010.*

---

<sup>1</sup> Questi aspetti saranno illustrati più nel dettaglio nel capitolo 6.1.

<sup>2</sup> Joss, J. and Waldvogel, A.: *A method to improve the accuracy of radar-measured amounts of precipitation*, in: Preprints, 14<sup>th</sup> Radar Meteorology Conf., Tucson, AZ, 237-238, 1970.

## 5 SPIEGAZIONE FISICA DEGLI EVENTI METEOROLOGICI DI INTERESSE

Gli eventi meteorologici possono essere di svariati tipi, ma quelli che ci interessano in questa sede sono fondamentalmente:

- Eventi di tipo convettivo.
- Eventi di tipo stratiforme.

La prima categoria, tipica dei mesi estivi, è caratterizzata da temporali. La seconda invece, frequente nei mesi più freddi, concerne fenomeni meno intensi, ma di durata maggiore. In altre parole, se i dBZ variano da un valore minimo  $A$  ad un valore massimo  $B$ , nel caso degli eventi convettivi si avrà un maggior numero di dBZ prossimi a  $B$  e nel caso degli eventi stratiformi, invece, un maggior numero di dBZ prossimo ad  $A$ .

### 5.1 EVENTI DI TIPO CONVETTIVO<sup>3</sup>

Per lo sviluppo di un temporale occorre che ci siano diversi importanti fattori: il riscaldamento, l'umidità e dell'aria relativamente fredda negli strati superiori della troposfera.

Il riscaldamento solare del suolo è importante perché l'aria calda, meno densa dell'aria fredda, sale verso l'alto espandendosi e raffreddandosi adiabaticamente (termiche convettive) di circa  $-1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  di dislivello.

L'umidità è fondamentale in quanto, al raggiungimento della temperatura di rugiada, inizia la condensazione e la cessione di calore latente. Questo provoca una diminuzione del raffreddamento, che diventa di circa  $-0.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  di dislivello e provoca l'aumento della velocità di risalita della termica (correnti ascensionali, o updraft) fino anche a  $30\text{ m/s}$ .

---

<sup>3</sup> <http://www.thunderstormteam.it/parametri-base>



Fig. 1-Rappresentazione di correnti termiche



Fig. 2-Condizioni di instabilità evidenziate dai moti convettivi interni al cumulonembo

L'accelerazione delle correnti verticali dovuta alla condensazione origina un risucchio d'aria dall'ambiente, sia dai lati della nube sia da sotto la stessa base nuvolosa: questa corrente caldo-umida che "alimenta" dal basso la nube si chiama inflow ed è quella che poi diverrà la corrente ascensionale all'interno della nube.

Dopo che la termica ha ceduto tutto il suo calore latente e raggiunge l'equilibrio termico, viene poi a contatto con le termiche più calde provenienti dal basso, risultando quindi più pesante. Ciò determina le correnti discendenti (o downdraft). In prossimità del suolo le correnti fredde si aprono a ventaglio

propagandosi orizzontalmente in maniera turbinosa: questa è la corrente chiamata outflow che costituisce il "fronte delle raffiche".

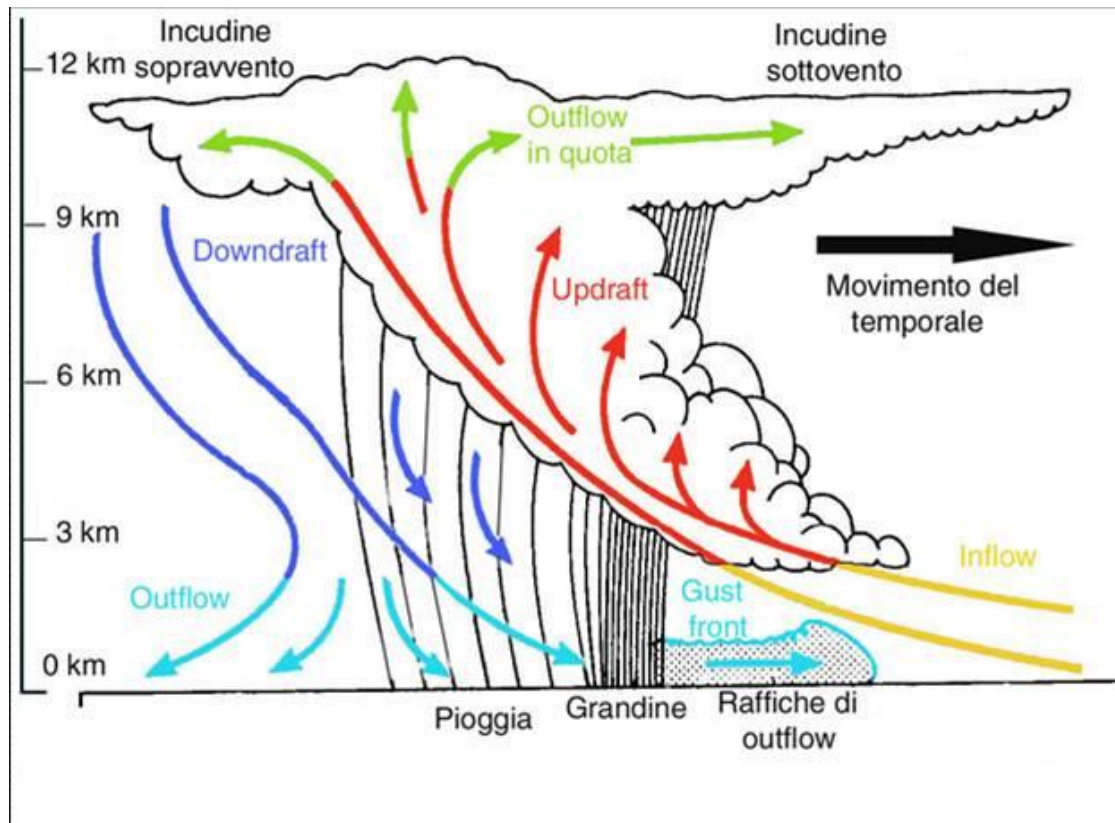


Fig. 3-Correnti agenti in un temporale che si muove da sinistra verso destra

Il collasso della cella temporalesca avviene per l'esaurimento del flusso ascendente dovuto al fatto che nel corso dell'evoluzione le correnti discendenti che accompagnano le precipitazioni tendono ad occupare gran parte della cella stessa, determinando un calo termico notevole nei bassi strati associato ad un aumento della pressione.

Nel caso del Piemonte, in estate l'aria fredda di origine atlantica proveniente da Nord-Ovest, una volta superate le Alpi, si incunea sotto strati di aria calda e umida della Pianura Padana, generando poderose nubi con sviluppo verticale soprattutto sulla fascia prealpina e pedemontana e provocando così forti nubifragi che possono durare anche molte ore.

Può capitare che le correnti provenienti da Nord-Ovest siano portatrici di nubi temporalesche già prima di arrivare in Pianura Padana. In tal caso i

nubifragi interessano anche zone prettamente alpine come la Valle d'Aosta, di per sé poco soggetta a piogge intense.

Gli eventi convettivi particolarmente intensi possono provocare più di 400 mm/24h. Poiché, come detto, questi sono fenomeni tipicamente estivi, simili intensità di pioggia risultano ancora più pericolose perché non avviene una parziale trattenuta dell'apporto meteorico sotto forma di neve.

## 5.2 EVENTI DI TIPO STRATIFORME

Al contrario di quanto accade nei temporali, negli eventi di tipo stratiforme l'estensione orizzontale delle nubi prevale su quella verticale, non vi sono moti convettivi e presentano un aspetto uniforme.

Quando uno strato d'aria si raffredda isobaricamente e giunge alla temperatura di rugiada, avviene il fenomeno di condensazione. Quando ciò accade in prossimità del suolo, si ha la nebbia, se accade a quote più elevate, si hanno nubi stratiformi. La loro formazione può avvenire per avvezione, cioè per trasporto orizzontale di masse d'aria calde sopra strati d'aria fredda, o per una graduale risalita di aria calda e umida attraverso uno strato d'aria più freddo. Le nubi stratiformi possono essere in alta, media o bassa quota.

Si chiama stratus la nube più bassa, dall'aspetto grigio ed uniforme che copre completamente (o quasi) il cielo. Può dar luogo a pioviggine o nevischio.

Si chiama stratocumulus quella nube che assume una forma a rotoli o lastricata in banchi grigio-biancastri e dà luogo a pioviggine o neve rotonda e granulosa.

Si chiama altostratus quella nube, collocata nella media atmosfera, dall'aspetto striato e grigio-azzurrognolo. Attraverso questo tipo di nuvola si riesce ad intravedere la sagoma di Sole e Luna. Solitamente dà luogo a pioggia continua, neve e grandine.

Si chiama altocumulus quella nube, generalmente rotondeggiante e a lamelle, che non dà mai luogo a precipitazioni.

Nella regione più alta della troposfera la nube di tipo stratiforme assume la denominazione di cirrostratus o cirrocumulus, a seconda che sia un velo biancastro che copre interamente il cielo o costituita da piccoli elementi increspati disposti piuttosto regolarmente.

La nube stratiforme maggiormente responsabile delle precipitazioni è il nimbostratus, che è un'estensione verticale dell'altostratus dall'aspetto grigio, cupo.



**Fig. 4-Nubi stratiformi**

In Piemonte le nubi stratiformi, tipiche dell'autunno e della primavera, tendono a stazionare a lungo a causa dello sbarramento orografico e del continuo apporto di aria calda e umida portata dal mare dal vento di Scirocco. Ciò provoca piogge diffuse e continue, principalmente nella fascia prealpina a nord del Po e soprattutto in autunno perché il mare, al termine dell'estate, ha una temperatura maggiore che in primavera e ciò fa aumentare l'umidità delle correnti di Scirocco.

## 6 REGISTRAZIONE DEI DATI PLUVIOMETRICI

### 6.1 PLUVIOGRAFO

Esistono vari tipi di pluviografi, come quelli a sifone, ma nel seguito ci si riferirà ai pluviografi a bascula, essendo questi più diffusi e precisi perché permettono di non perdere il rilevamento dell'acqua piovana durante la fase di svuotamento.

#### 6.1.1 FUNZIONAMENTO DEL PLUVIOGRAFO A BASCULA

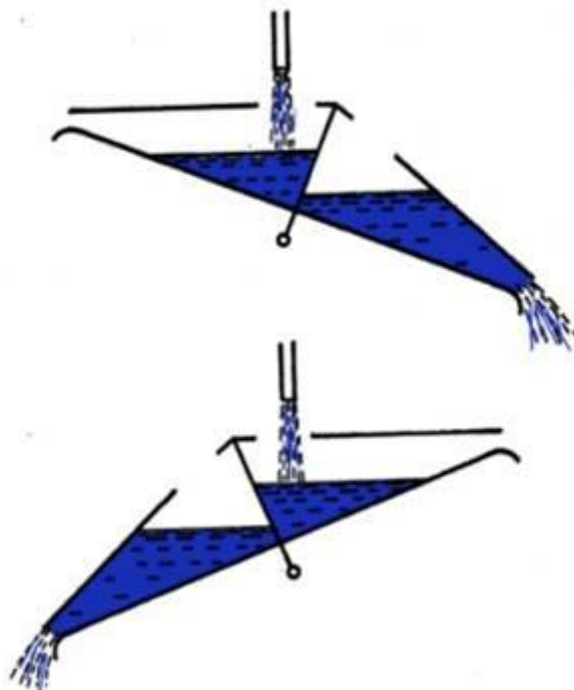
L'acqua entra attraverso un imbuto la cui sezione d'ingresso è solitamente di  $1000 \text{ cm}^2$ , cioè con un diametro di circa 35 cm. L'imbocco è a spigolo vivo in modo che l'area suddetta sia definita in modo preciso. In prossimità dell'entrata è installata una rete a maglie larghe che, pur permettendo lo sgocciolamento interno, trattiene foglie e aghi di pino. Più verso l'interno è situata una rete a maglie fini per trattenere terra e sabbia.

A valle dell'imbuto lo strumento è costituito da un rullo rotante avvolto da un nastro di carta millimetrata. A contatto col nastro vi è un pennino connesso ad una bascula costituita da 2 vaschette collegata tramite un tubo di plastica all'imbuto esterno.

L'acqua piovana caduta nell'imbuto viene convogliata tramite il tubo di plastica ad una delle 2 vaschette e ciò, a causa del peso dell'acqua, provoca una progressiva inclinazione della bascula e questa, a sua volta, fa muovere il pennino. Quando una vaschetta arriva al colmo della sua capienza, la bascula si ribalta svuotando l'acqua immagazzinata, mentre l'altra vaschetta comincia a riempirsi. In questo caso il movimento del pennino avviene nel senso opposto al precedente, per mezzo di una camma a cardioide che ne inverte il movimento ad ogni svuotamento.



**Fig. 5-Stazione vista dall'esterno**  
Si nota la posizione rialzata e l'assenza di paraventi. La presenza di vegetazione è una possibile causa di intasamento.



**Fig. 6-Bascula**  
Lo svuotamento avviene ogni 2 mm di pioggia.





Fig. 7-Striscia di carta millimetrata

In orizzontale ciascun trattino (o modulo) rappresenta l'ora, mentre il modulo in verticale indica 0,2 mm di pioggia caduta, quindi 5 tacche rappresentano 1 mm d'acqua e sono racchiuse da due linee orizzontali più marcate.

Infine, i tratti verticali od inclinati indicano i quantitativi di acqua meteorica caduta in un certo intervallo temporale, mentre quelli orizzontali denotano assenza di precipitazioni.

### 6.1.2 PROBLEMI INERENTI I PLUVIOGRAFI

Il pluviometro, affinché fornisca valori attendibili, dev'essere posizionato correttamente:

- Dev'essere in bolla.
- La pioggia che vi cade dev'essere quanto più possibile non condizionata da eventuali ostacoli, per cui il pluviometro è generalmente posto ad un'altezza di 1.7-2 m dal suolo. Ma ciò pone il problema del vento. In Inghilterra, sfruttando il fatto che al suolo il vento è minimo, si usano pluviometri interrati, ma ciò accentua il problema dell'intasamento e degli ostacoli.
- Dev'essere protetto dal vento con dei paravento affinché la pioggia vi cada quanto più possibile verticalmente. Il vento, facendo cadere obliquamente la pioggia, entra nel pluviometro sfruttando una superficie efficace minore di quella reale e ciò porta ad una sottostima dei valori di pioggia.

Ciononostante è comunque soggetto a imprecisioni dovute a:

- I punti elencati prima, i cui effetti collaterali non sono del tutto eliminabili.
- L'effetto splash.
- Attriti interni dei meccanismi.
- Intasamento, per esempio se è in prossimità di alberi.
- Neve, per la quale si usano particolari accorgimenti, come pluviometri riscaldati elettricamente o con gas (nivopluviografi).
- Si hanno misure puntuali e non areali. Mediamente vi è una stazione ogni 100 Km<sup>2</sup>. Per tale area il pluviometro non fornisce dati rappresentativi per tempi minori a circa un'ora perché la perturbazione non ha il tempo di spostarsi su tutta l'area.
- Nel caso del pluviometro a bascula, vi sono perdite volumetriche perché quando la bascula ruota e si svuota, una parte della pioggia continua ad entrare nella vaschetta che si sta svuotando invece di entrare nell'altra. Ciò è comunque meglio di quanto avverrebbe con un pluviografo a sifone: in tal caso la fase svuotamento impiega più tempo e, in questo tempo, tutta la pioggia che vi cade dentro non viene rilevata.

Questi fattori contribuiscono a sottostimare notevolmente l'altezza di pioggia rilevata nel caso di precipitazioni intense oltre i 300 mm/h.

## 6.2 RETE METEROIDROGRAFICA PIEMONTESE

Per far fronte al dissesto idrogeologico che si manifesta periodicamente tramite eventi critici di diverse intensità e tali da provocare danni a cose e persone, è necessaria una rete meteoidrografica che fornisca informazioni continue sull'intera Regione. Attraverso tale monitoraggio, che è anche in tempo reale, è possibile comprendere meglio i fenomeni di instabilità e quindi di prevenirli.

Suddetta rete, nel caso del Piemonte, è in teletrasmissione in tempo reale. L'attuale struttura, concepita nel 1988, è suddivisa nelle seguenti 4 sottostrutture (di cui si descrive la strumentazione) utili ad assolvere specifiche esigenze ed è costituita da oltre 400 impianti con circa una stazione ogni 100 km<sup>2</sup>.

1. Stazione pluviometrica. La dotazione strumentale minima consiste in un pluviometro a cui si associano localmente altri sensori meteorologici.
2. Stazione meteorologica. Le stazioni complete dispongono di pluviometro, termometro, igrometro, misuratore di velocità e direzione del vento e localmente barometro e radiometro.
3. Stazione nivometrica. In ambiente di alta montagna le stazioni aggiungono alla normale configurazione meteorologica i sensori di altezza della neve e temperatura del manto nevoso. I dati nivometrici così rilevati integrano quelli raccolti dalla rete nivometrica manuale, fornendo indicazioni relative ad aree non presidiate e di particolare interesse.
4. Stazione idrometrica. La dotazione strumentale minima consiste in un idrometro ad ultrasuoni a cui si associano localmente un idrometro a pressione e vari sensori meteo pluviometrici<sup>4</sup>.

Ovviamente la rete meteoidrografica piemontese, in base ad accordi interregionali, è interfacciata a quelle del Canton Ticino, Valle d'Aosta, Liguria, Lombardia, Emilia-Romagna e Veneto in modo tale da coprire tutto il bacino idrografico del Po.

---

<sup>4</sup> ARPA Piemonte, Idrografica automatica.

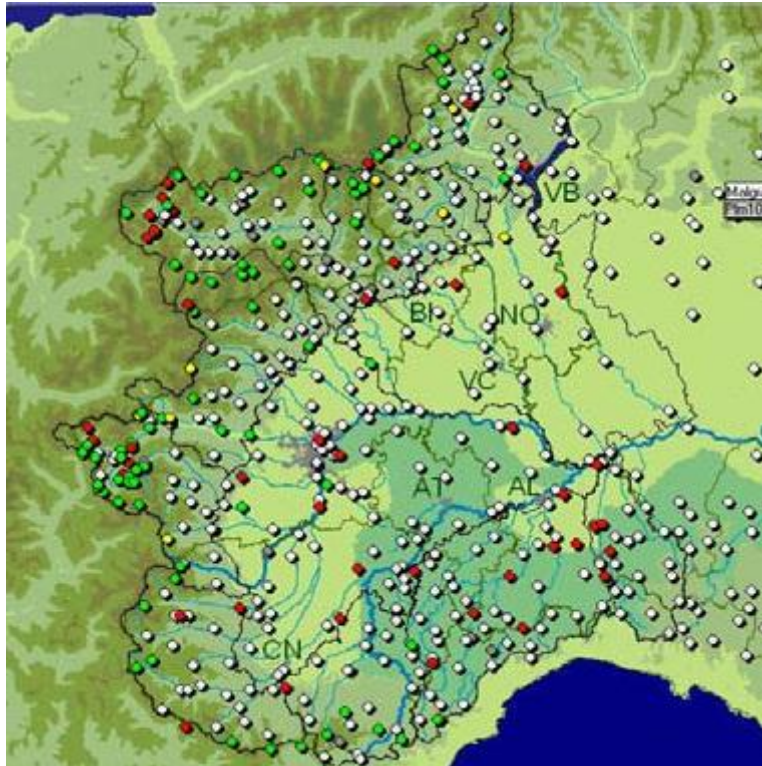


Fig. 8-Rete meteoidrografica di Piemonte, Valle d'Aosta e Liguria



Fig. 9-Stazione meteorologica di Monte Malanotte

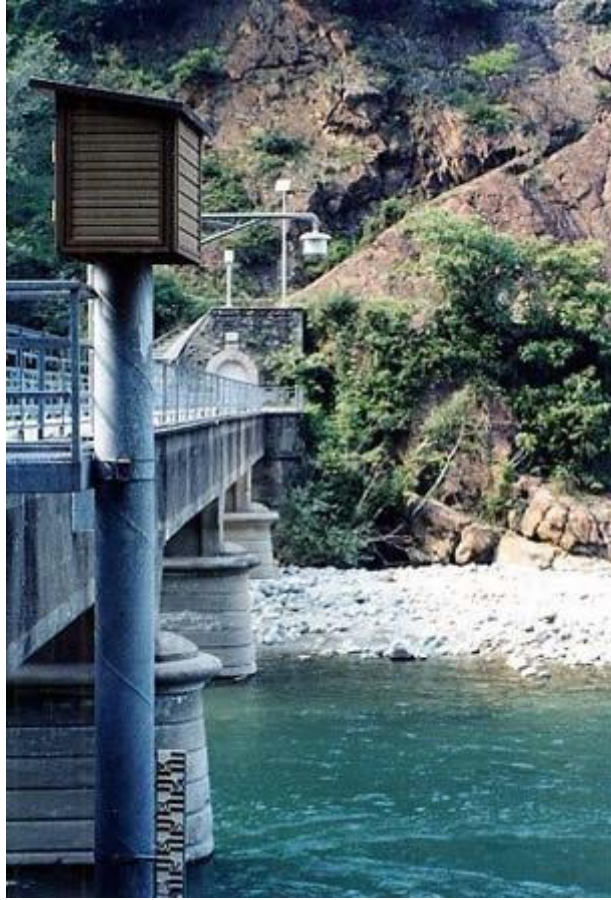


Fig. 10-Stazione idrometrica Stura di Lanzo

## 7 LA RELAZIONE Z/R

La relazione  $Z/R$  è a potenza<sup>5</sup> e qui di seguito si spiega il motivo.

Il tasso di precipitazione  $R$  è:

$$R = \int_0^{D_{max}} N(D) \pi \frac{D^3}{6} v(D) dD$$

Dove

$N$ : numero delle idrometeore.

$\pi \frac{D^3}{6}$ : volume delle idrometeore.

$v$ : velocità di caduta delle idrometeore.

$D$ : diametro delle idrometeore.

La riflettività  $Z$  è definita come

$$Z = |K|^2 \int_0^{D_{max}} N(D) D^6 dD$$

Dove

$K$ : costante dielettrica dell'acqua.

Secondo la classica formulazione di *Marshall e Palmer*<sup>6</sup>,  $N$  è definito come

$$N(D) = N_0 D e^{-\lambda D}$$

Con

$$N_0 = 8000 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$$

$$\lambda = 4.1 R^{-0.21} \text{ mm}^{-1}$$

Considerando la Formula 4 e la Formula 5, si nota che hanno una formulazione simile. Operando le sostituzioni, si ottiene appunto una formula del tipo  $Z = aR^b$ , dove  $a, b = f(\lambda, K, N_0, v)$ .

---

<sup>5</sup> Remko Uijlenhoet, *Raindrop size distributions and radar reflectivity-rain rate*, Hydrology and Earth System Sciences, 5(4), 615-627, 2001.

<sup>6</sup> Marshall, J.S. and Palmer, W.M., *The distribution of raindrops with size*, J. Meteorol., 5, 165-166, 1948.

A seconda dei valori assunti da tali costanti, si hanno coppie  $a-b$  diverse. Nel caso di Marshall e Palmer, per esempio, si perviene a  $a=200$ ,  $b=1.6$ .

Comunque i coefficienti  $a-b$  della relazione  $Z/R$  (utilizzata da oltre 50 anni<sup>7</sup> per la stima del campo di precipitazioni  $R$  a partire dalla riflettività  $Z$ ), sono determinati soprattutto empiricamente e variano a seconda del clima locale. Per esempio *Battan (1973)* trovò empiricamente 69 formulazioni  $Z-R$  corrispondenti ad altrettante situazioni meteorologiche in varie parti del pianeta<sup>8</sup>.

A titolo di esempio si osservi la seguente tabella<sup>9</sup>, riferita a 5 diverse situazioni:

**Tab. 1-Esempi di formule  $Z/R$  a variare del tipo di precipitazione**

RELATIONSHIP	Optimum for:	Also recommended for:
Marshall-Palmer ( $z=200R^{1.6}$ )	General stratiform precipitation	
East-Cool Stratiform ( $z=130R^{2.0}$ )	Winter stratiform precipitation - east of continental divide	Orographic rain - East
West-Cool Stratiform ( $z=75R^{2.0}$ )	Winter stratiform precipitation - west of continental divide	Orographic rain - West
WSR-88D Convective ( $z=300R^{1.4}$ )	Summer deep convection	Other non-tropical convection
Rosenfeld Tropical ( $z=250R^{1.2}$ )	Tropical convective systems	

Inoltre, sovente, i meteorologi scelgono quale formula usare, tra quelle disponibili in letteratura, in base all'esperienza e a considerazioni soggettive.

---

<sup>7</sup> Remko Uijlenhoet, *Raindrop size distributions and radar reflectivity-rain rate*, Hydrology and Earth System Sciences, 5(4), 615-627, 2001  
relationships for radar hydrology

<sup>8</sup> Battan, L.J., *Radar observation of the atmosphere*, The University of Chicago Press, Chicago, 324 pp., 1973.

<sup>9</sup> Nelson, Brian R., D.-J. Seo, and D. Kim, 2011, *Multisensor Precipitation Reanalysis*, J. Hydrometeor., 11, 666-682.

## 8 RADAR METEOROLOGICO

Serve a localizzare le precipitazioni, stimare la tipologia di idrometeore, calcolare il movimento delle perturbazioni, l'intensità e la posizione futura a breve termine. I moderni radar meteorologici sono generalmente di tipo Doppler ad impulsi.

Lo schema di funzionamento di un qualsiasi radar è il seguente:

- Trasmettitore A che genera l'impulso di energia.
- Dispositivo B che trasmette l'impulso all'antenna.
- Antenna C che emette l'impulso nell'atmosfera e riceve l'impulso di ritorno.
- Dispositivo B che trasmette l'impulso di ritorno al ricevitore.
- Ricevitore D che elabora il segnale proveniente da B e lo rende fruibile dall'utente.
- Display E.

Il dispositivo B ha dunque una funzione di "spartitraffico" tra i segnali emessi e quelli ricevuti e dunque coordina il funzionamento di trasmettitore e ricevitore.

### 8.1 RAGGIO D'AZIONE DEL RADAR

Il raggio d'azione del radar è univocamente determinato in base alla frequenza di emissione del segnale, poiché il segnale di ritorno deve arrivare prima che sia emesso quello successivo.

Posto:

$f_{imp}$ : frequenza di ripetizione dell'impulso.

$c$ : velocità della luce in m/s.

$T$ : periodo, cioè l'intervallo temporale di emissione del segnale. Quindi durante  $T$  il segnale parte e torna indietro.

$L$ : spazio percorso durante  $T$ .

$r_{max}$ : raggio d'azione del radar.

$r$ : spazio percorso dal segnale al generico istante  $t \leq \frac{T}{2}$ .



Allora,

$$f_{imp} = 1000 \text{ Hz} \Rightarrow T = 10^{-3} \text{ s}$$

$$L = cT = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^5 \text{ m} = 300 \text{ Km}$$

da cui

$$r_{max} = \frac{L}{2} = 150 \text{ Km}$$

Quindi

Formula 7

$$r_{max} = \frac{1}{2} c f_{imp}^{-1}$$

Allora

Formula 8

$$r = \frac{1}{2} ct$$

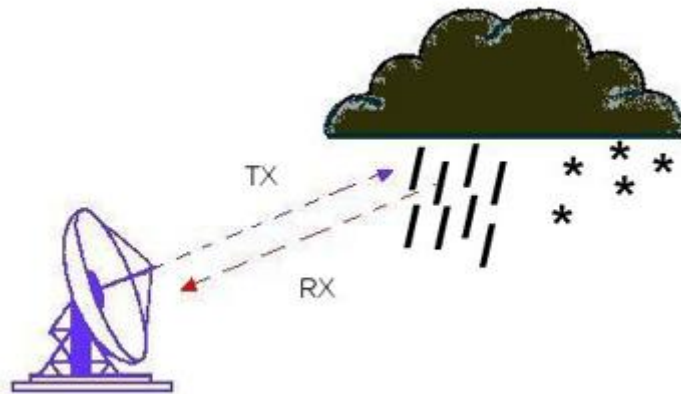


Fig. 11-Principio di funzionamento del radar

È da notare che l'emissione del segnale radar è di tipo conico e ciò comporta una diminuzione della risoluzione all'aumentare di  $r$ . Per  $r_{max}=150 \div 200 \text{ Km}$  il volume d'aria coperta dal segnale è di circa  $1 \text{ Km}^3$ .

## 8.2 PROBLEMI INERENTI I RADAR METEOROLOGICI

### 8.2.1 ATTENUAZIONE

È un fenomeno che comporta una diminuzione del segnale di ritorno ed è costituita da 2 diversi fenomeni: l'assorbimento e lo scattering. Entrambi peggiorano all'aumentare della frequenza del segnale e della distanza del bersaglio dal radar.

Per quanto riguarda l'assorbimento, l'impatto tra onda e particella non è perfettamente elastico e parte dell'energia ne viene assorbita.

Per quanto riguarda lo scattering, la lunghezza d'onda del segnale emesso è di 1÷10 cm (onde radio). 10 cm corrisponde a circa 10 volte il diametro delle idrometeore che interessa monitorare attraverso il radar e, dopo l'emissione del segnale, si verifica la diffusione di Rayleigh, o anche scattering di Rayleigh, che consiste in uno "sparpagliamento" del segnale quando questo incontra delle particelle. Quando l'onda ne incontra una, viene deflessa, cambiando la propria traiettoria, ma nel caso dello scattering non si può parlare di "rifrazione" o "riflessione", in quanto tutto il fenomeno avviene in modo caotico.

La formula di Rayleigh per il coefficiente di diffusione è la seguente:

**Formula 9**

$$k_s = \frac{2}{3} \pi^6 n \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \frac{d^5}{\lambda^4}$$

Dove:

$n$ : numero di centri di diffusione, cioè delle idrometeore.

$d$ : diametro delle idrometeore.

$m$ : coefficiente di rifrazione.

$\lambda$ : lunghezza d'onda.

La Formula 9 vale secondo le seguenti ipotesi:

- $d \ll \lambda$ .
- dispersione isotropa.

Per inciso, il fenomeno di scattering spiega anche perché il cielo è blu: il termine  $1/\lambda^4$  porta ad un  $k_s$  via via più elevato andando verso gli ultravioletti, quindi il blu viene diffuso più del rosso. Al tramonto o all'alba, aumentando  $n$ , anche la luce nel campo del rosso viene diffusa abbastanza da essere visibile.

Quando le dimensioni di  $d$  e  $\lambda$  diventano paragonabili (quindi con frequenze del segnale più elevate), si usa il modello di diffusione di Mie, che segue comunque lo stesso principio e, in ogni caso, solo una parte del segnale viene riflesso in direzione del radar che l'aveva emesso.

### 8.2.2 RIFLESSIONE ANOMALA

L'inversione della temperatura, frequente nelle prime ore del mattino, può determinare uno strato d'aria calda sovrastante uno strato d'aria fredda. In tal caso può accadere che il segnale radar venga riflesso, generando così delle false eco.

### 8.2.3 OGGETTI INDESIDERATI

Oltre alle idrometeore, vengono investiti dal fascio radar anche altri oggetti detti *clutter*, come montagne, edifici, aerei, uccelli, insetti.

Il problema dei *clutter* è risolvibile in gran parte tramite una preventiva mappatura degli ostacoli fissi, quali montagne ed edifici. Altri *clutter*, come gli aerei, sono identificabili perché lasciano eco caratteristiche e dunque eliminabili in fase di analisi dei dati.

## 8.3 POTENZA E RIFLETTIVITÀ

L'output del radar meteorologico consiste generalmente in 2 informazioni: riflettività Z e velocità (nonché direzione) di una perturbazione. *L'onda elettromagnetica emessa dal radar sotto forma di impulsi viene retrodiffusa dalle nubi, che costituiscono il bersaglio meteorologico. La misura della potenza e della fase (radar Doppler) della radiazione ricevuta permette di caratterizzare la natura del bersaglio meteorologico. In particolare la misura di potenza, che viene quantificata per mezzo dell'unità logaritmica dBZ, risulta legata alla quantità d'acqua presente nella nube, mentre la misura della fase permette di ricavare un'informazione legata alla velocità di spostamento della nube*<sup>10</sup>. La riflettività, è dunque l'equivalente radar dell'altezza di pioggia rilevata dai pluviografi ed è determinata nel seguente modo.

#### Formula 10

---

<sup>10</sup> <http://www.arpa.piemonte.it/index.php?module=ContentExpress&func=display&ceid=399&meid=-1>

$$P_r(t) = \frac{\pi^3 P_T G^2 G_R \Theta^2 c t |K|^2 Z}{2^{10} \ln(2) \lambda^2 r^2 L_{atm}^2 L_{MF}}$$

Dove:

$P_r$ : Potenza che torna indietro al radar dal bersaglio al tempo  $t$ .

$P_T$ : massima potenza trasmessa dal radar.

$G$ : rendimento di amplificazione dell'antenna.

$G_R$ : rendimento totale di ricezione, comprensivo delle perdite tra antenna e dispositivi elettronici.

$K, \Theta$ : costanti dell'antenna.

$\lambda$ : lunghezza d'onda.

$L_{atm}$ : perdite in atmosfera dovute all'attenuazione (8.2.1) tra radar e bersaglio; dev'essere stimato empiricamente.

$L_{MF}$ : perdite nei filtri.

La formula è valida nell'ipotesi che il fascio radio formato dall'antenna abbia una forma circolare simmetrica e che l'intero volume scansionato sia soggetto a precipitazioni.

Allora, si può esplicitare rispetto a  $Z$ :

**Formula 11**

$$Z = C_r r^2 L_{atm}^2 P_r = \left[ \frac{mm^6}{mm^3} \right]$$

Dove

$C_r$ : è una costante del radar dove sono conglobate le precedenti costanti.

Come detto nell'introduzione, la formula empirica che lega  $Z$  e  $R$  è del tipo  $Z = aR^b = \left[ \frac{mm^3}{h} \right]$ , da cui

$$R = \left( \frac{Z}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Siccome i valori di  $Z$  osservati sono molto variabili, come detto pocanzi viene usata la scala logaritmica, quindi

**Formula 12**

$$Z^* = 10 \log Z = [dBZ]$$

Cioè

**Formula 13**

$$Z = 10^{\frac{Z^*}{10}}$$

E infine

**Formula 14**

$$R = \left( \frac{10^{\frac{Z^*}{10}}}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Si ottengono analoghi risultati da

$$Z = aR^b \rightarrow 10 \log Z = 10 \log(aR^b) = Z^*$$

da cui si ricava

**Formula 15**

$$R = 10^{\frac{Z^* \log a}{10b}}$$

La Formula 14 e la Formula 15 sono equivalenti, infatti

$$R = \left( \frac{10^{\frac{Z^*}{10}}}{a} \right)^{\frac{1}{b}} = \frac{10^{\frac{Z^*}{10b}}}{a^{\frac{1}{b}}} = \frac{10^{\frac{Z^*}{10b}}}{10^{\log a^{\frac{1}{b}}}} = 10^{\frac{Z^* \log a}{10b}}$$

#### 8.4 INDIVIDUAZIONE DEL BERSAGLIO, CAMPI $Z$ & $R$ NELLO SPAZIO, CAMPO $R$ SULLA SUPERFICIE TERRESTRE

Si è descritto il principio di funzionamento del radar, tuttavia la riflettività  $Z$  dev'essere riferita ad un punto preciso dello spazio. Servono 3 informazioni:

- Azimuth rispetto al nord.
- Angolo di elevazione  $\theta$  rispetto al piano tangente il punto della superficie terrestre su cui è situato il radar.
- La distanza  $r$  tra radar e bersaglio, ricavabile dalla Formula 8.

Che sono tutti dati noti.

Dunque, facendo ruotare il radar di  $360^\circ$  secondo diverse elevazioni in un dato tempo, si ottiene una mappatura completa del campo  $Z$  nel raggio coperto dal segnale in quell'intervallo temporale. Poi, tramite la Formula 14, si perviene al corrispondente campo  $R$ . Si ha così una stima distribuita nello spazio di  $Z$  e  $R$ . Generalmente, però, interessa una stima puntuale di  $R$  sulla superficie terrestre, che è ottenibile sommando gli  $R$  trovati, fissando l'azimuth, al variare di  $\theta$ , cioè analizzando i profili verticali di  $R$ .

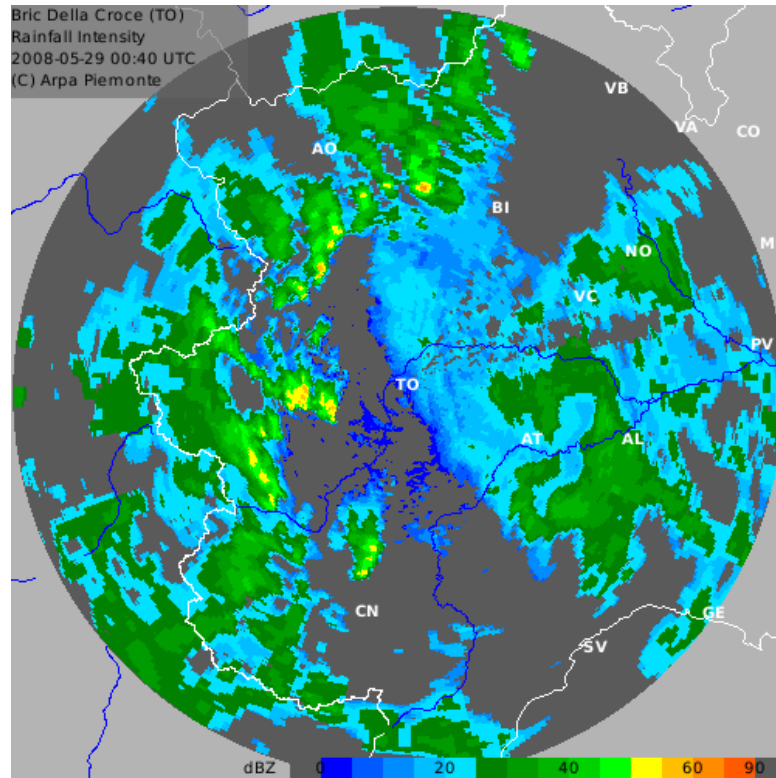


Fig. 12-Campo  $R$  delle precipitazioni

## 8.5 RADAR DI ARPA PIEMONTE

ARPA Piemonte elabora dati provenienti da 2 radar, uno installato nel 1999 presso il Bric della Croce, sulla sommità della collina torinese a 710 m slm, l'altro sull'Appennino Ligure-Piemontese sul Monte Settepani, ad una quota di 1387 m slm. Entrambi sono in banda C <sup>11</sup> di tipo Doppler e polarimetrici.

Ogni 10 minuti inviano al Centro Funzionale di *ARPA Piemonte* i dati acquisiti, che sono la riflettività orizzontale, la velocità Doppler, l'ampiezza di spettro della velocità Doppler e la riflettività differenziale.

Più precisamente la scansione operativa, della durata complessiva di 10 minuti, è costituita da una fase primaria (elevata frequenza di emissione del segnale, 11 elevazioni, acquisizione della riflettività differenziale) utile per

<sup>11</sup> La Banda C, secondo la suddivisione effettuata dalla NATO delle onde radar, è quella tra 500 e 1000 MHz.

ottenere stime quantitative, e da una secondaria (bassa frequenza di ripetizione del segnale, 4 elevazioni) per il monitoraggio<sup>12</sup>.

I dati riguardanti questa tesi, comunque, fanno riferimento al radar di Bric della Croce, mentre il radar di Monteseppani è utilizzato per altre applicazioni<sup>13</sup> in collaborazione con la Protezione Civile della Regione Liguria.

Il radar di Bric della Croce *invia alla Sala Situazione Rischi Naturali i propri dati in base ai quali viene stimata la distribuzione di vari parametri meteorologici sull'intero territorio regionale. Lo strumento si presta a molteplici applicazioni:*

- *monitoraggio in tempo reale di intensità di precipitazione, velocità del vento, presenza di grandine ecc., entro un raggio di 230 km dal sito radar e con una definizione di 1 km<sup>2</sup>;*
- *previsioni a brevissimo termine (fino a 6 ore) di fenomeni temporaleschi associati a precipitazioni intense, grandine, ecc.;*
- *previsioni di piena: l'utilizzo congiunto del radar e della rete di monitoraggio al suolo permette una stima delle precipitazioni effettivamente cadute sul territorio regionale che viene utilizzata per inizializzare modelli idrologici<sup>14</sup>.*

---

<sup>12</sup> Matteo Carazzo, *Selezione di eventi di precipitazione estrema di breve e lunga durata sulla Regione Piemonte*, Tesi di laurea specialistica in Ingegneria Civile, Torino, A. A. 2009-2010.

<sup>13</sup> *Con la messa in esercizio del radar dell'Appennino Ligure-Piemontese sul Monte Settepani, finanziato nell'ambito di un programma INTERREG II e realizzato e gestito dalle Regioni Liguria e Piemonte, si completa il sistema di monitoraggio del Mediterraneo occidentale. Esso rivolge una particolare attenzione a quei fenomeni convettivi che si originano sul Golfo Ligure e, muovendosi verso nord, investono, con drammatiche conseguenze, il territorio regionale. Il radar del Settepani realizza l'importante continuità tra i radar francesi e quelli dell'Italia settentrionale e centrale, permettendo di rappresentare in un'unica mappa meteorologica l'evoluzione costantemente aggiornata dei fenomeni interessanti l'intera area.*

<sup>14</sup> <http://www.arpa.piemonte.it/index.php?module=ContentExpress&func=display&ceid=363&meid=-1>



Fig. 13-Radar di Bric della Croce



Fig. 14-Raggi d'azione dei 2 radar  
Distano 95 Km



## 9 EVENTI ANALIZZATI

### 9.1 ATTIVITÀ DI RACCOLTA DATI PRESSO ARPA PIEMONTE E FORMATO DEI DATI

Una notevole parte del lavoro è stata la raccolta dei dati, che si è svolta presso l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte (ARPA Piemonte) e ha consistito nel recupero dei dati radar e delle serie pluviometriche per i seguenti eventi che, in base a precedenti analisi<sup>15</sup>, risultavano essere i più critici a partire dal 2003.

<b>Tab. 2- Eventi di tipo convettivo reperiti presso ARPA Piemonte</b>		
<b>ANNO</b>	<b>DATA</b>	<b>NUMERO DI GIORNI</b>
2003	27/07	1
2005	02/08	1
	20/08	1
2006	06/07	1
	12/07	1
	08/08	1
	30/08	1
2008	29/05	1

<b>Tab. 3- Eventi di tipo stratiforme reperiti presso ARPA Piemonte</b>		
<b>ANNO</b>	<b>DATA</b>	<b>NUMERO DI GIORNI</b>
2003	31/10 - 01/11	2
	01/12 - 04/12	4
2004	25/10 - 02/11	9
2005	15/04 - 17/04	3
	06/09 - 12/09	7
2006	14/09 - 15/09	2
2007	01/05 - 04/05	4
	25/05 - 28/05	4
2008	28/10 - 06/11	10
	16/12 - 17/12	2

---

<sup>15</sup> Matteo Carazzo, *Selezione di eventi di precipitazione estrema di breve e lunga durata sulla Regione Piemonte*, Tesi di laurea specialistica in Ingegneria Civile, Torino, A. A. 2009-2010.

Il programma che gestisce il radar crea dei file (volumi) in cui sono memorizzate tantissime informazioni: sono una sorta di “scatola nera” del radar e di ciò che questo ha rilevato in un dato istante. Di conseguenza i dati che ci interessano, cioè i valori di riflettività ogni 10 minuti per ogni data, sono ottenibili solo con appositi programmi che vadano a leggere suddetti volumi traendone specifiche informazioni. Il nostro compito, della durata di circa 3 mesi, era appunto reperire quei volumi, archiviati prevalentemente su nastro, e lanciare i programmi atti a estrarne le riflettività.

Tuttavia, al termine di tale operazione, si ottengono dei file di testo non ancora utilizzabili per i nostri scopi. Questi, infatti, contengono una mappatura completa della riflettività su tutto il volume scansionato dal radar, mentre il nostro interesse è avere stime puntuali in corrispondenza delle stazioni pluviografiche piemontesi ogni 10 minuti.

Di conseguenza si rendeva necessario conoscere le coordinate UTM delle varie stazioni e, tramite il Gis, interfacciare la rete UTM dei pluviometri ai file di testo citati pocanzi. La rete UTM delle stazioni è nota dai file contenenti le serie pluviometriche (in allegato al punto 13.1).

Infine, una volta caricati sul Gis i dati radar e lanciando un apposito programma, dopo qualche ora si ottiene un file di testo con i valori *dBZ* cercati.

Premesso che noi non ci siamo curati degli aspetti concernenti il Gis, ma solo di far girare i programmi per ottenere il file di testo con i valori *dBZ*, in allegato al punto 13.2, si riporta un esempio di output del Gis relativo ad una delle 378 stazioni.

## 9.2 SCELTA DEGLI EVENTI

In questa tesi, solo una parte degli eventi delle precedenti tabelle è stata analizzata. Più precisamente:

<b>Tab. 4-Eventi di tipo convettivo analizzati</b>				
<b>ANNO</b>	<b>DATA</b>	<b>NUMERO DI GIORNI</b>	<b>MAX mm/h</b>	<b>MAX dBZ</b>
2005	02/08	1	147.60	57.50
	20/08	1	156.00	61.50
2006	06/07	1	127.20	56.50
2008	29/05	1	97.20	56.50

<b>Tab. 5- Eventi di tipo stratiforme analizzati</b>				
<b>ANNO</b>	<b>DATA</b>	<b>NUMERO DI GIORNI</b>	<b>MAX mm/h</b>	<b>MAX dBZ</b>
2006	14/09 - 15/09	2	114.00	57.50
2007	01/05 - 04/05	4	104.40	54.00

L'analisi è estesa a tutte le stazioni pluviografiche della Regione Piemonte (punto 13.1).

Data l'estrema variabilità dei valori ogni 10 minuti, nella successiva analisi dei dati si opererà un'operazione di filtraggio su media mobile di 30 e 60 minuti consecutivi.

## 10 METODOLOGIA DI ANALISI

### 10.1 EVENTI CONVETTIVI

Nel caso degli eventi convettivi, l'analisi dei dati sarà svolta con 3 diverse modalità.

#### 10.1.1 FORMULA DI JOSS E WALDVOGUEL (1970)

Come detto nell'introduzione, è la formula ( $Z=300R^{1.5}$ ) attualmente utilizzata da *ARPA Piemonte*.

Poiché lo scopo della tesi è cercare di migliorare le stime di pioggia rispetto a quelle ottenibili con la formula di *Joss e Waldvoguel*, lo scopo di questa analisi è poter, in seguito, effettuare un confronto.

#### 10.1.2 REGRESSIONE LINEARE<sup>16</sup>

Sarà effettuata in base alla generica Formula 1 ( $Z=aR^b$ ).

Si tralasciano quelle coppie di valori per cui  $dBZ < 10$ . Infatti tali bassi valori rappresentano spesso un rumore di fondo di riflettività radar e considerarli comporterebbe una determinazione di  $a-b$  la cui applicazione provocherebbe stime di pioggia cumulata eccessive rispetto a quelle note dai pluviometri<sup>17</sup>.

Si consideri la seguente

**Formula 16**

$$Z_i = aR_{ip}^b$$

Dove

- $R_p$  è  $R_{pluviometro}$
- $i$  va da 1 a  $N$

---

<sup>16</sup> Kamil S. Ali and Medhat H. Said, *Determination of Radar Z-R Relationship For Libya – Tripoli City*, Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol I, 2009.

WCE 2009, July 1 - 3, 2009, London, U.K.

<sup>17</sup> L. Alfieri, P. Claps, F. Laio, *Time-dependent Z-R relationships for estimating rainfall fields from radar measurements*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 26 January 2010, p. 151

- $N$  è il numero di misure  $R_p$  disponibili per un singolo evento. L'ordine di grandezza di  $N$  per un singolo giorno è  $N=6*24*378=54432$ , cioè 6 rilevamenti all'ora per 24 ore per 378 stazioni. In realtà, per ogni singolo giorno di analisi,  $N$  sarà leggermente minore di 54432. Il motivo di tale differenza è che non tutti gli  $R_p$  e i  $dBZ$  sono disponibili (avarie radar, dati non pervenuti, pluviografi guasti).

Allora, dalla Formula 16:

$$10 \log Z_i = 10 \log a + 10b \log R_{ip}$$

In base alla Formula 12, posto  $Z^*_i=y_i$  sia ha

**Formula 17**

$$y_i = bx_i + c$$

Dove

**Formula 18**

$$x_i = 10b \log R_{ip}$$

**Formula 19**

$$c = 10 \log a$$

Da cui:

**Formula 20**

$$a = 10^{\frac{c}{10}}$$

Dati dei generici punti  $x_i$  e  $y_i$ , l'interpolazione consiste nel trovare l'equazione di una curva che minimizzi lo scostamento tra i punti e la curva stessa. Sul grafico  $x$ - $y$  si ottengono dei punti  $(x_i, y_i)$ , ma non si hanno informazioni su valori intermedi. Si rende dunque necessaria un'interpolazione, affinché sia possibile trovare una curva in grado di mettere in corrispondenza biunivoca qualunque coppia  $(x, y)$ .

Le generiche coordinate  $(x_i, y_i)$  di un punto sono legate da una relazione del tipo

**Formula 21**

$$y_i = dx_i + e + f_i$$

dove

$f_i$ : è una variabile aleatoria che ne esprime lo scostamento dalla retta  $y=dx+e$  che si cerca.

$d, e$ : opportune costanti.

Procedendo con l'interpolazione per mezzo del "metodo dei minimi quadrati", si cerca l'equazione  $y=dx+e$  che minimizzi la sommatoria dei quadrati degli scostamenti  $f_i$  rispetto all'equazione stessa. È necessario minimizzare la sommatoria dei quadrati degli scostamenti per avere sempre valori positivi, in modo tale che durante le somme alcuni di essi non si elidano a vicenda, cosa che avverrebbe considerando la sommatoria degli scostamenti. Supponendo che i punti da interpolare siano  $N$ , si cerca

**Formula 22**

$$S = \sum_{i=1}^N f_i^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - dx_i - e)^2 = \min$$

annullando le derivate parziali rispetto ad  $d$  ed  $e$ :

**Formula 23**

$$\frac{\partial S}{\partial d} = 2 \left( - \sum_{i=1}^N x_i y_i + d \sum_{i=1}^N x_i^2 + e \sum_{i=1}^N x_i \right) = 0$$

**Formula 24**

$$\frac{\partial S}{\partial e} = 2 \left( - \sum_{i=1}^N y_i + d \sum_{i=1}^N x_i + de \right) = 0.$$

Da cui:

**Formula 25**

$$d = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i y_i) - \bar{x} \bar{y}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \bar{x}^2}$$

Dove

**Formula 26**

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

**Formula 27**

$$e = \bar{y} - d \bar{x}$$

### 10.1.2.1 COEFFICIENTE DI DETERMINAZIONE ( $R^2$ )

Si calcolerà inoltre il coefficiente di determinazione  $R^2$ , definito come:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^N f_i^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^N (y_i - dx_i - e)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

$R^2 = -1 \div 1$ . Per  $R^2 = 1$  il modello di regressione lineare descrive perfettamente il fenomeno, Per  $R^2 \leq 0$  è il contrario. Si nota che  $R^2$  tende a 1 quando più le  $f_i$  tendono a 0. Ciò accade se il modello di regressione descrive così bene il fenomeno che rappresenta, da essere il fenomeno stesso.

### 10.1.3 MINIMIZZAZIONE DELL'ERRORE QUADRATICO MEDIO (EQM)<sup>18</sup>

Si tratta di un processo di ottimizzazione non-lineare, che verrà effettuato per via numerica in base alla generica Formula 1 ( $Z = aR^b$ ), variandone i coefficienti  $a$  e  $b$ , in modo da minimizzare l'errore quadratico medio, definito come

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{i \text{ pluviometro}} - R_{i \text{ radar}})^2}$$

Dove:

- $i$  va da 1 a  $N$
- $N$  è il numero di misure  $R_p$  e  $R_r$  disponibili per un singolo evento.

## 10.2 EVENTI STRATIFORMI

Nel caso degli eventi stratiformi, la minimizzazione dell'errore quadratico medio porta a risultati inattendibili a causa della natura stessa del fenomeno meteorologico. Per capire come procedere, è possibile riflettere sul tipo di informazione che, in definitiva, si vuol avere dal radar. Il radar non è né sostitutivo dei pluviometri, né dei satelliti meteorologici. I primi danno

---

<sup>18</sup> L. Alfieri, P. Claps, F. Laio, *Time-dependent Z-R relationships for estimating rainfall fields from radar measurements*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 26 January 2010, p. 151.

una misura puntuale di pioggia, i secondi permettono di fare previsioni meteorologiche a distanza di ore e giorni su aree vastissime, ma non sono idonei a fornire informazioni quantitative precise (come per esempio l'intensità di pioggia) su piccole aree. Il radar è un "ibrido" delle 2 cose, perché fornisce dati quantitativi e permette di fare previsioni, ma ha scopi radicalmente diversi dall'uno e dall'altro. Il radar serve a monitorare in tempo reale una situazione meteorologica in atto su un'area molto circoscritta delimitata dal suo raggio d'azione. La sua utilità emerge soprattutto come efficace strumento di prevenzione, in quanto permette di monitorare l'evolversi di una situazione critica nel volgere di poche decine di minuti, fornendo informazioni sia sulla direzione della perturbazione, sia quantitativamente sull'intensità del fenomeno. È chiaro che queste informazioni risultano tanto più utili quanto più il fenomeno è critico "a breve tempo", cioè quanto più è caratterizzato da  $dBZ$  elevati. Un evento stratiforme (tipicamente della durata di giorni), può sì essere critico sulla rete idrografica, ma difficilmente può essere fonte di problemi nel volgere di poche decine di minuti. Eventuali problemi "a breve tempo" possono sorgere solo durante i picchi, caratterizzati da  $dBZ$  elevati, analogamente a quanto accade per gli eventi convettivi. Da quanto detto appare evidente che è più utile stimare  $a-b$  dando un peso maggiore ai  $dBZ$  elevati. Ciò negli eventi convettivi è automatico; per risolvere la questione per quanto riguarda gli eventi stratiformi sembrerebbe dunque percorribile la strada di considerare solo i  $dBZ$  elevati, ma ciò non è possibile per 2 buoni motivi.

Il primo è che non esiste un criterio assoluto per stabilire quale sia la soglia oltre la quale i  $dBZ$  possono considerarsi elevati: un valore è "alto" o "basso" in relazione agli altri. Ad esempio considerare solo i  $dBZ > 40$  non significherebbe valutare solo i valori "alti", ma bensì "rendere bassi" quelli appena sopra i 40. Infatti, data la natura degli eventi stratiformi, vi sarà sempre una più elevata concentrazione di coppie  $R_{radar}-R_{pluviometro}$  caratterizzate da  $dBZ$  intorno al valore 40, che diminuirà all'aumentare dei  $dBZ$ : il problema rimarrebbe inalterato rispetto a prima, ma semplicemente traslato verso l'alto.



Il secondo è che aumentando troppo la soglia di accettazione dei *dBZ*, oltre a non risolvere il problema, lo si peggiora in quanto ovviamente si perde gran parte dell'informazione fornita dai *dBZ* esclusi.

Una buona strategia è dunque applicare agli eventi stratiformi i valori *a-b* trovati per gli eventi.

Nel caso degli eventi stratiformi, dunque, l'elevato numero di *dBZ* bassi crea un rumore di fondo che comporta dei problemi di stima, per cui l'analisi avverrà in 2 passaggi

- In base alla formula di *Joss e Waldvogel*.
- In base alla Formula 1 ( $Z=aR^b$ ) utilizzando i valori *a-b* trovati per gli eventi convettivi con il processo di ottimizzazione non-lineare.

## 11 RISULTATI

Da qui in poi, per designare le date, si adotterà la convenzione anglosassone *YYYYMMDD*, perché è quella effettivamente usata nei programmi e nel materiale a nostra disposizione.

Ricordiamo i seguenti aspetti:

- La formula di *Joss e Waldvogel* (1970), cioè  $Z=aR^b=300R^{1.5}$  ( $a=300$ ,  $b=1.5$ ), è quella attualmente usata da ARPA Piemonte.
- Il processo di ottimizzazione non-lineare, finalizzato alla minimizzazione numerica dell'errore quadratico medio (EQM), è utilizzato solo per gli eventi convettivi, secondo quanto detto nel capitolo 10.

Tab. 6-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la formula di Joss e Waldvogel con il filtro di media mobile di 10 minuti				
	$a_{ARPA}$	$b_{ARPA}$	$R^2_{ARPA10}$	$EQM_{ARPA10}$
<b>20050802</b>	300.00	1.50	0.22	4.13
<b>20050820</b>	300.00	1.50	0.35	3.54
<b>20060706</b>	300.00	1.50	0.41	3.21
<b>20080529</b>	300.00	1.50	0.36	4.00
<b>20060914-20060915</b>	300.00	1.50	0.0002	5.29
<b>20070501-20070504</b>	300.00	1.50	0.0009	2.67
<b>TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI</b>	300.00	1.50	0.27	3.96
<b>TUTTI GLI EVENTI STRATIFORMI</b>	300.00	1.50	0.006	3.73

Tab. 7-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la regressione lineare con il filtro di media mobile di 10 minuti				
	$a_{regr.lin10}$	$b_{regr.lin10}$	$R^2_{regr.lin10}$	$EQM_{regr.lin10}$
<b>20050802</b>	147.71	0.87	0.08	150.08
<b>20050820</b>	110.98	1.32	0.29	12.58
<b>20060706</b>	243.48	1.09	0.29	13.85
<b>20080529</b>	195.65	0.95	0.20	63.53
<b>20060914-20060915</b>	333.42	0.02	-	3.83E+149
<b>20070501-20070504</b>	156.27	0.23	2.076E-06	3.46E+11
<b>TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI</b>	177.94	0.94	0.11	76.85
<b>TUTTI GLI EVENTI STRATIFORMI</b>	262.25	0.11	3.836E-06	2.40E+28

Tab. 8-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con il processo di ottimizzazione non-lineare con il filtro di media mobile di 10 minuti				
	$a_{non.lin10}$	$b_{non.lin10}$	$R^2_{non.lin10}$	$EQM_{non.lin10}$
20050802	107.99	2.06	0.28	3.79
20050820	119.34	2.10	0.44	3.04
20060706	266.35	1.74	0.44	3.15
20080529	218.82	1.72	0.39	3.58
TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI	123.89	1.95	0.33	3.52

Tab. 9-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la formula di Joss e Waldvogel con il filtro di media mobile di 30 minuti				
	$a_{ARPA}$	$b_{ARPA}$	$R^2_{ARPA30}$	$EQM_{ARPA30}$
20050802	300.00	1.50	0.41	2.90
20050820	300.00	1.50	0.45	2.58
20060706	300.00	1.50	0.54	2.25
20080529	300.00	1.50	0.45	2.97
20060914-20060915	300.00	1.50	0.0005	4.75
20070501-20070504	300.00	1.50	0.0015	2.33
TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI	300.00	1.50	0.44	2.75
TUTTI GLI EVENTI STRATIFORMI	300.00	1.50	0.010	3.32

Tab. 10-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la regressione lineare con il filtro di media mobile di 30 minuti				
	$a_{regr.lin30}$	$b_{regr.lin30}$	$R^2_{regr.lin30}$	$EQM_{regr.lin30}$
20050802	165.55	0.92	0.23	49.81
20050820	171.25	0.97	0.21	55.62
20060706	325.22	0.78	0.24	75.36
20080529	250.11	0.75	0.16	233.14
20060914-20060915	332.54	0.01	-	1.2142E+149
20070501-20070504	173.10	0.16	5.70057E-06	8.53E+16
TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI	211.80	0.87	0.17	80.19
TUTTI GLI EVENTI STRATIFORMI	265.00	0.10	9.965E-06	2.28E+30

Tab. 11-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con il processo di ottimizzazione non-lineare con il filtro di media mobile di 30 minuti				
	$a_{non.lin30}$	$b_{non.lin30}$	$R^2_{non.lin30}$	$EQM_{non.lin30}$
20050802	120.29	1.81	0.46	2.77
20050820	117.00	1.85	0.52	2.32
20060706	259.62	1.53	0.54	2.24
20080529	219.40	1.72	0.49	2.80
TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI	197.74	1.69	0.48	2.62

Tab. 12- Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la formula di Joss e Waldvogel con il filtro di media mobile di 60 minuti				
	$a_{ARPA}$	$b_{ARPA}$	$R^2_{ARPA60}$	$EQM_{ARPA60}$
20050802	300.00	1.50	0.48	2.39
20050820	300.00	1.50	0.50	2.04
20060706	300.00	1.50	0.60	1.74
20080529	300.00	1.50	0.48	2.56
20060914-20060915	300.00	1.50	0.0016	4.40
20070501-20070504	300.00	1.50	0.0024	2.11
TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI	300.00	1.50	0.50	2.24
TUTTI GLI EVENTI STRATIFORMI	300.00	1.50	0.014	3.05

Tab. 13- Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con la regressione lineare con il filtro di media mobile di 60 minuti				
	$a_{regr.lin60}$	$b_{reg.lin60}$	$R^2_{regr.lin60}$	$EQM_{regr.lin60}$
20050802	187.27	0.78	0.20	129.58
20050820	202.12	0.75	0.11	360.80
20060706	388.65	0.59	0.15	661.27
20080529	278.71	0.60	0.10	1325.67
20060914-20060915	333.50	0.00	-	1.2E+149
20070501-20070504	178.34	0.13	1.00556E-05	2.54E+20
TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI	242.44	0.70	0.10	381.20
TUTTI GLI EVENTI STRATIFORMI	265.53	0.10	2.97868E-05	7.66E+28

Tab. 14- Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio ottenuti con il processo di ottimizzazione non-lineare con il filtro di media mobile di 60 minuti				
	$a_{non.lin60}$	$b_{non.lin60}$	$R^2_{non.lin60}$	$EQM_{non.lin60}$
20050802	164.90	1.56	0.49	2.36
20050820	117.23	1.85	0.57	1.87
20060706	260.05	1.53	0.61	1.73
20080529	219.90	1.72	0.52	2.47
TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI	198.18	1.69	0.54	2.16

### 11.1 CONSIDERAZIONI SULLA REGRESSIONE LINEARE

Confrontando le precedenti tabelle, si osserva che la regressione lineare comporta delle coppie di valori  $a$ - $b$  che determinano sempre un peggioramento del coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) e dell'errore quadratico medio (EQM) rispetto alla formula di *Joss e Waldvogel* attualmente utilizzata da *ARPA Piemonte*. A tal proposito osserviamo, a titolo di esempio, il seguente grafico relativo alla regressione lineare della Formula

16 su TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI per la finestra temporale di 30 minuti (Tab. 11).

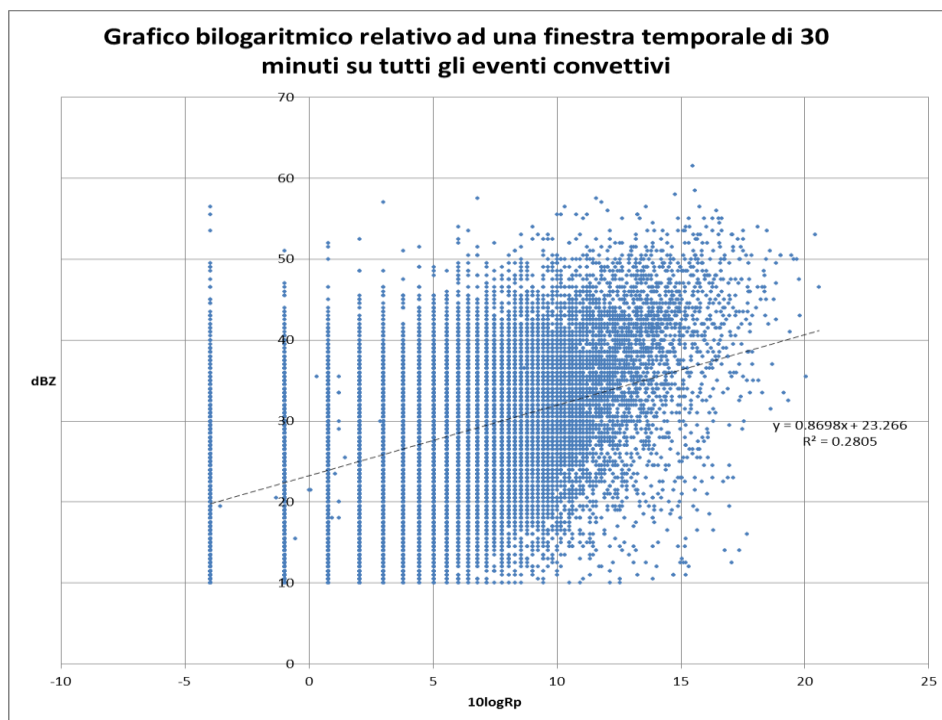


Fig. 15-Esempio di regressione lineare

Linearizzare l'equazione a potenza tramite il passaggio ai logaritmi di cui al punto 10.1.2 significa dare lo stesso peso a tutte le coppie  $(x_i, y_i)$  (Formula 17, Formula 18, Formula 19), ma questo, in realtà, crea un'impresione dovuta al fatto che la relazione di partenza in realtà non è lineare. Tale inesattezza risulta a tal punto aggravata dalla grande quantità di punti che si analizzano, cioè dalla vastità dell'area che si studia (tutto il Piemonte), da risultare inattendibile.

## 11.2 DETERMINAZIONE DELLA FINESTRA TEMPORALE OTTIMALE

Nel precedente paragrafo si è visto che la regressione lineare, nei casi analizzati, non è idonea a trovare formule sostitutive a quella di *Joss e Waldvogel*.

Tuttavia, sempre osservando le precedenti tabelle (Tab. 8, Tab. 11, Tab. 14), si nota che il processo di ottimizzazione non-lineare porta, nel caso degli eventi convettivi, alla determinazione di coppie  $a-b$  tali da comportare

sempre un miglioramento del coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) e dell'errore quadratico medio (EQM) per ogni finestra di media mobile analizzata: 10, 30, 60 minuti. Prendiamo dunque in considerazione il caso più generale, cioè i coefficienti  $a$ - $b$  trovati analizzando TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI, per le diverse finestre mobili.

Facendo riferimento alle Tab. 8, Tab. 11, Tab. 14, abbiamo le seguenti coppie di valori (evidenziate) con relativi valori del coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) e dell'errore quadratico medio (EQM).

Tab. 15-Coppie a-b determinate con il processo di ottimizzazione non-lineare su tutti gli eventi convettivi per le finestre mobili di 10, 30 e 60 minuti												
Durata F. temporale [min]	10				30				60			
	a	b	$R^2$	EQM	a	b	$R^2$	EQM	a	b	$R^2$	EQM
	non.lin10	non.lin10	non.lin10	non.lin10	non.lin30	non.lin30	non.lin30	non.lin30	non.lin60	non.lin60	non.lin60	non.lin60
TUTTI GLI EVENTI CONVETTIVI	123.89	1.95	0.33	3.52	197.74	1.69	0.48	2.62	198.18	1.69	0.54	2.16

A questo punto si tratta di:

- Scegliere una di queste 3 coppie.
- Verificare se la coppia scelta fornisce, per tutte le finestre temporali, risultati migliori rispetto alla formula di *Joss e Waldvogel* sia per gli eventi convettivi, sia per quelli stratiformi.

### 11.2.1 CRITERIO DI SCELTA

Per comprendere quale coppia scegliere tra quelle riportate in Tab. 15, si osservi la seguente figura, in cui è graficato il coefficiente di determinazione e l'errore quadratico medio al variare della finestra mobile (in linea continua l'andamento secondo la formula di *Joss e Waldguel*).

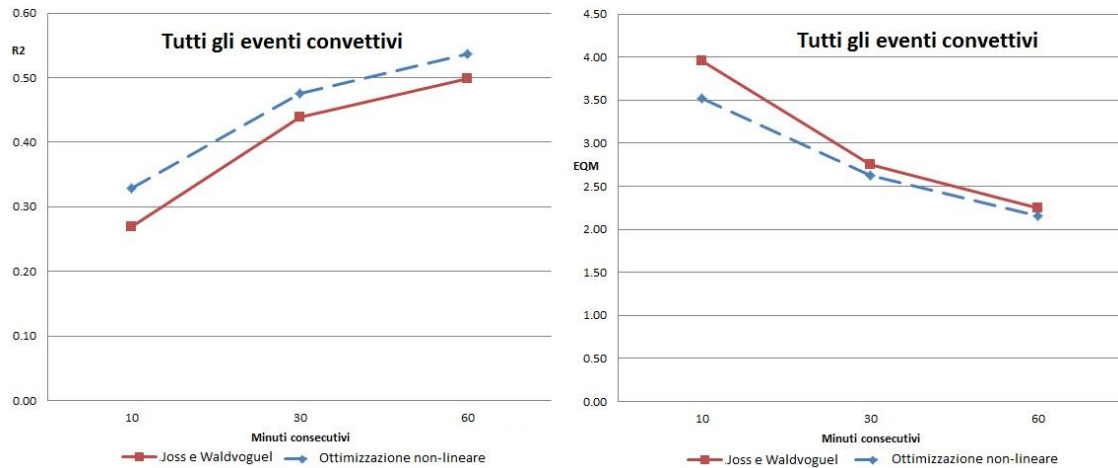


Fig. 16-Coefficiente di determinazione ed errore quadratico medio al variare della finestra temporale mobile

Dalla Fig. 16 si nota che, all'aumentare del filtro di media mobile, il coefficiente di determinazione tende ad aumentare sempre meno, mentre l'errore quadratico medio tende a diminuire sempre meno.

Dunque prendiamo in considerazioni i coefficienti relativi al filtro di 60 minuti, cioè

$$a_{\text{definitivo}}=198.18$$

$$b_{\text{definitivo}}=1.69$$

essendo quelli caratterizzati dal coefficiente di determinazione maggiore e dall'errore quadratico medio minore.

### 11.2.2 VERIFICA DELLA COPPIA $a$ - $b$ TROVATA

Come detto precedentemente, si deve adesso verificare che i coefficienti trovati forniscano risultati migliori rispetto alla formula di *Joss e Waldvoguel* per tutti gli eventi: sia convettivi, sia stratiformi e per tutte le finestre mobili (10, 30, 60 minuti).

Nei seguenti paragrafi mettiamo a confronto i coefficienti di determinazione ( $R^2_{\text{definitivo}10,30,60}$ ) e gli errori quadratici medi ( $EQM_{\text{definitivo}10,30,60}$ ) trovati con  $a_{\text{definitivo}}=198.18$ ,  $b_{\text{definitivo}}=1.69$  con quelli che si erano determinati tramite la formula di *Joss e Waldvoguel*) nelle Tab. 6, Tab. 9, Tab. 12 ( $R^2_{\text{ARPA}10,30,60}$  e  $EQM_{\text{ARPA}10,30,60}$ ). Per i grafici si rimanda in allegato, al punto 13.3.

Tab. 16-Verifica di $a=198.18$ , $b=1.69$ per il filtro di 10 minuti su tutti gli eventi				
	$R^2_{\text{definitivo10}}$	$R^2_{\text{ARPA10}}$	$EQM_{\text{definitivo10}}$	$EQM_{\text{ARPA10}}$
<b>20050802</b>	0.25	0.22	3.92	4.13
<b>20050820</b>	0.39	0.35	3.15	3.54
<b>20060706</b>	0.44	0.41	3.09	3.21
<b>20080529</b>	0.39	0.36	3.65	4.00
<b>20060914-20060915</b>	0.0003	0.0002	5.20	5.29
<b>20070501-20070504</b>	0.0011	0.0009	2.61	2.67

Tab. 17-Verifica di $a=198.18$ , $b=1.69$ per il filtro di 30 minuti su tutti gli eventi				
	$R^2_{\text{definitivo30}}$	$R^2_{\text{ARPA30}}$	$EQM_{\text{definitivo30}}$	$EQM_{\text{ARPA30}}$
<b>20050802</b>	0.45	0.41	2.83	2.90
<b>20050820</b>	0.50	0.45	2.38	2.58
<b>20060706</b>	0.56	0.54	2.22	2.25
<b>20080529</b>	0.49	0.45	2.79	2.97
<b>20060914-20060915</b>	0.0008	0.0005	4.69	4.75
<b>20070501-20070504</b>	0.0019	0.0015	2.30	2.33

Tab. 18-Verifica di $a=198.18$ , $b=1.69$ per il filtro di 60 minuti su tutti gli eventi				
	$R^2_{\text{definitivo60}}$	$R^2_{\text{ARPA60}}$	$EQM_{\text{definitivo60}}$	$EQM_{\text{ARPA60}}$
<b>20050802</b>	0.51	0.48	2.35	2.39
<b>20050820</b>	0.55	0.50	1.91	2.04
<b>20060706</b>	0.62	0.60	1.73	1.74
<b>20080529</b>	0.52	0.48	2.43	2.56
<b>20060914-20060915</b>	0.0022	0.0016	4.34	4.40
<b>20070501-20070504</b>	0.0028	0.0024	2.09	2.11

Come si vede le verifiche risultano soddisfatte, in quanto è sempre:

- $R^2_{\text{definitivo10}} > R^2_{\text{ARPA10}}$
- $R^2_{\text{definitivo30}} > R^2_{\text{ARPA30}}$
- $R^2_{\text{definitivo60}} > R^2_{\text{ARPA60}}$
- $EQM_{\text{definitivo10}} < EQM_{\text{ARPA10}}$
- $EQM_{\text{definitivo30}} < EQM_{\text{ARPA30}}$
- $EQM_{\text{definitivo60}} < EQM_{\text{ARPA60}}$



## 12 CONCLUSIONI

Lo scopo di questa tesi era trovare una formula in grado di fornire stime di pioggia più precise rispetto a quelle ottenibili con la formula di *Joss e Waldvogel* attualmente usata da ARPA Piemonte. Per ottenere lo scopo si sono utilizzate 2 metodologie: una consistente in una regressione lineare, l'altra in un processo di ottimizzazione non-lineare finalizzato alla minimizzazione numerica dell'errore quadratico medio.

La regressione lineare non dà risultati soddisfacenti perché l'analisi estesa ad un'area troppo vasta comporta un numero eccessivo di dati i quali, vista la reale non-linearità del problema, determinano errori di stima tali da fornire risultati peggiori di quelli ottenuti con la formula di *Joss e Waldvogel*.

Il processo di ottimizzazione non-lineare è stato applicato dapprima

- Agli eventi convettivi presi singolarmente.

Ottenendo 3 coppie *a-b* per ogni evento, ognuna delle quali relativa rispettivamente alle finestre mobili di 10, 30 e 60 minuti.

- All'insieme degli eventi convettivi.

Ottenendo 3 coppie *a-b* ognuna delle quali relativa rispettivamente alle finestre mobili di 10, 30 e 60 minuti.

E si è sempre riscontrato un miglioramento del coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) e dell'errore quadratico medio (EQM).

In seguito si è mostrato che all'aumentare della finestra mobile il miglioramento degli  $R^2$  e degli EQM tende a diventare trascurabile e, delle 3 precedenti coppie, si è scelta quella relativa al filtro di media mobile di 60 minuti, cioè  **$a=198.18$** ,  **$b=1.69$** , perché è quella che comporta gli  $R^2$  maggiori e gli EQM minori.

Applicando suddetta coppia nei seguenti casi:

- Eventi convettivi
- Eventi stratiformi

Si è riscontrato sempre un miglioramento degli  $R^2$  e degli EQM rispetto alla formula di *Joss e Waldvogel*.

In conclusione, in vece dell'attuale Formula 2, si ottiene la seguente

**Formula 30**  
 **$Z = 198.18R^{1.69}$**

che, per gli eventi analizzati, appare più opportuna a valutare il campo di precipitazione areale  $R$  del Piemonte, noto il campo spaziale di riflettività  $Z$ , rispetto alla formula di *Joss e Waldvogel* attualmente usata.



## 13 ALLEGATI

### 13.1 ANAGRAFICA DELLE STAZIONI

Sono evidenziate le stazioni valdostane, ma ve ne sono molte anche lombarde. Il fatto che stazioni non piemontesi si trovino nella seguente tabella non significa che si trovino anche nel raggio del radar, tuttavia alcune di esse sì. In ogni caso il problema di identificare a priori quali si trovino o no nel raggio del radar non si pone per 2 motivi. Il primo è che il radar è cambiato e stazioni prima non raggiunte, potrebbero esserlo attualmente. Il secondo è che le stazioni fuori raggio vengono da noi automaticamente tolte nella fase di elaborazione.

Tab. 19-Anagrafica delle stazioni					
	STAZIONE	C. ISTAT	UTM 32T EST	UTM 32T NORD	QUOTA SLM
			[m]	[m]	[m]
1	ALA_DI_STURA	1003900	367642	5019242	1006
2	ANDRATE_PINALBA	1010900	413632	5046071	1580
3	VACCERA	1011900	358034	4970850	1435
4	AVIGLIANA	1013900	373774	4994834	340
5	RIFUGIO_GASTALDI	1019900	354502	5017939	2659
6	BALME	1019901	360677	5018290	1410
7	PRERICHARD	1022900	320334	4994017	1353
8	BARDONECCHIA_MELEZET	1022902	317833	4990752	1791
9	BARDONECCHIA_PIAN_DEL_SOLE	1022903	319383	4992738	1585
10	MELEZET_START_SBX	1022904	318026	4991381	1612
11	BARDONECCHIA_PRANUDIN	1022905	319476	4997331	2045
12	ROCHEMOLLES	1022906	324349	5000119	1975
13	COLLE_BARANT	1026900	346624	4959923	2294
14	BOBBIO_PELLICE	1026901	351091	4964711	1312
15	BORGOFRANCO_D'IVREA	1030900	410087	5040929	337
16	BORGONE	1032900	361958	4997582	400
17	BRANDIZZO_MALONE	1034700	409882	5004010	192
18	CAVALLARIA	1036900	407006	5041287	1270
19	CALUSO	1047900	409921	5015808	257
20	CANDIA	1050900	413755	5019418	226
21	CARMAGNOLA	1059900	396316	4971343	232
22	CARMAGNOLA_PLUVIO	1059901	396335	4971359	232
23	CASELLE	1063900	394093	5004633	300

24	CASTAGNETO_PO	1064900	412336	5000464	540
25	LAGO_AGNEL	1073900	354620	5036811	2304
26	CERESOLE_VILLA	1073901	360163	5033606	1581
27	COLLE_BERCIA	1074900	325119	4976764	2200
28	SAN_SICARIO	1074901	329444	4981815	2087
29	CESANA_THURAS	1074902	329829	4973144	1918
30	FINIERE	1080900	340117	4998152	813
31	CLAVIERE	1087900	322988	4978237	2030
32	COAZZE	1089900	361760	4989322	1130
33	COLLERETTO	1091900	395253	5033160	1240
34	PRAROTTO	1093900	361575	5000935	1440
35	PIANO_AUDI	1094900	383959	5023497	1150
36	CORIO	1094901	386008	5018529	624
37	CUMIANA	1097900	373174	4980375	327
38	PRA'_CATINAT	1103900	348435	4989063	1670
39	FRONT_MALONE	1109900	395441	5015494	270
40	VAL_CLAREA	1114900	340068	5000850	1135
41	FORNO_ALPI_GRAIE	1118900	361004	5024732	1215
42	LANZO	1128900	381885	5016336	580
43	LANZO_STURA_DI_LANZO	1128901	381063	5014078	540
44	LEMIE	1131900	364567	5009893	995
45	BERTODASCO	1134900	375704	5033193	1120
46	LAGO_DI_VALSOERA	1134901	374477	5038301	2365
47	ROSONE	1134902	376375	5032521	701
48	LUSERNA_S._GIOVANNI	1139900	361006	4963859	475
49	MARENTINO	1144900	411791	4988907	345
50	MASSELLO	1145900	347455	4980522	1388
51	MEUGLIANO	1151900	404848	5036493	650
52	CHIAVES	1155900	375704	5021638	1617
53	BAUDUCCHI	1156900	398228	4979528	226
54	NOASCA	1165900	368058	5034971	1055
55	GAD	1175900	329988	4990162	1065
56	CHATEAU_BEULARD	1175903	323132	4988527	1800
57	PARELLA_CHIUSELLA	1179900	406046	5030506	260
58	PERRERO_GERMANASCA	1186900	355142	4978853	662
59	TALUCCO	1191900	365228	4978893	776
60	SAN_MARTINO_CHISONE	1191901	364487	4971847	410
61	PINEROLO	1191902	370552	4973026	340
62	PINO_TORINESE	1192900	402828	4988482	608
63	PIVERONE	1196900	424479	5031426	230
64	POIRINO_BANNA	1197900	407716	4975370	237
65	CLOT_DELLA_SOMA	1201900	337795	4983288	2150
66	PRAGELATO_-	1201902	337847	4986187	1525

	_TRAMPOLINO_A_VALLE				
67	PRAGELATO	1201903	336373	4984288	1620
68	PRALY	1202900	346730	4974411	1385
69	PRALORMO	1203900	414152	4967469	295
70	RIVOLI_LA_PEROSA	1219900	381938	4993117	362
71	FORZO	1224900	381912	5041306	1162
72	SALBERTRAND	1232900	334301	4993216	1010
73	LE_SELLE	1232901	336091	4991300	1980
74	SANTENA_BANNA	1257900	403991	4977715	238
75	SAUZE_CESANA	1258900	335756	4973540	1840
76	LAGO_PILONE	1259900	332693	4985596	2280
77	SAUZE_D'OULX	1259901	330512	4988380	1373
78	SESTRIERE	1263900	332444	4979926	2020
79	SESTRIERE_BORGATA	1263905	333662	4981761	1887
80	SESTRIERE_ALPETTE	1263906	333556	4979878	2250
81	SESTRIERE_BANCHETTA	1263907	335258	4981370	2480
82	SPARONE	1267900	386141	5029706	550
83	PIETRASTRETTA	1270901	347088	5000758	520
84	TORINO_VALLERE	1272904	395596	4985890	239
85	TORINO_REISS_ROMOLI	1272905	395422	4995197	270
86	TORINO_VIA_DELLA_CONSOLATA	1272906	396054	4992433	290
87	TORINO_GIARDINI_REALI	1272907	397112	4991946	239
88	TRANA_SANGONE	1276900	375630	4988307	371
89	TRAVERSELLA	1278900	399204	5042642	1165
90	MALCIAUSSIA	1282900	354672	5007898	1800
91	LAGO_DIETRO_LA_TORRE	1282901	356046	5013564	2360
92	PIAMPRATO	1288900	388706	5045997	1555
93	VARISELLA	1289900	379872	5005760	615
94	BARCENISIO	1291901	341798	5006429	1525
95	VENARIA_CERONDA	1292900	392460	4998970	253
96	VEROLENGO	1293900	422382	5004180	163
97	VIALFRE'	1296900	407466	5026023	459
98	VILLAFRANCA_PELLICE	1300700	381427	4963366	260
99	NIQUIDETTO	1313900	371184	5006333	1416
100	VIU'_CENTRALE_FUCINE	1313901	371673	5010080	715
101	BOCCHETTA_DELLE_PISSE	2002900	414792	5081006	2410
102	ALAGNA	2002901	417511	5080844	1196
103	ALBANO_VERCELLESE	2003900	452241	5031988	155
104	OROPA	2012900	420668	5053282	1186
105	BIELLA	2012901	426445	5045652	405
106	BOCCIOLETO	2014900	431070	5076272	800
107	BORGOSIESIA_SESIA	2016901	442551	5065261	371
108	CARCOFORO	2029900	426444	5084376	1290

109	CELLIO	2038900	447736	5066833	705
110	FOBELLO	2057900	434800	5082809	873
111	GRAGLIA	2064900	418148	5046913	1375
112	LOZZOLO	2072901	448135	5054747	533
113	MASSAZZA	2074900	435193	5036020	226
114	MASSERANO	2075900	441949	5045398	243
115	PETTINENGO	2092900	430102	5051091	725
116	BIELMONTE	2094900	428083	5057024	1480
117	PIEDICAVALLO	2095900	418813	5060264	1040
118	PRAY_SESSERA	2105900	439458	5058321	409
119	RASSA	2110900	423601	5069104	950
120	RIMA	2111900	423210	5081369	1289
121	SABBIA	2123900	440818	5078628	600
122	TRICERRO	2147900	447480	5009461	139
123	TRIVERO	2149900	433695	5058489	1108
124	CAMPARIENT	2149901	428882	5064888	1515
125	VARALLO	2156900	443670	5074457	470
126	VERCELLI	2158900	452237	5019386	132
127	MONTE_MESMA	3002900	456546	5069173	540
128	ALPE_CHEGGIO	3003900	431711	5104080	1460
129	ALPE_DEVERO	3010900	443114	5129624	1634
130	ANZINO	3011900	434710	5093118	669
131	PIZZANCO	3020900	436556	5108355	1142
132	LAGO_PAIONE	3020901	437588	5114118	2269
133	BORGOMANERO	3024900	458054	5059749	300
134	CAMERI	3032900	476179	5044074	173
135	CANNOBIO	3034900	476204	5101570	201
136	CEPPO_MORELLI	3048900	426224	5093256	1995
137	CERANO	3049900	484546	5029197	125
138	CESARA	3050900	450752	5076235	500
139	CICOGNA	3053900	460716	5094778	696
140	CRODO	3057900	447933	5119640	560
141	CURSOLO	3059900	466641	5105305	940
142	DOMODOSSOLA	3061900	446156	5105927	252
143	DRUOGNO	3063900	455744	5109311	831
144	FORMAZZA	3067900	450779	5142603	2453
145	FORMAZZA_BRUGGI	3067901	456129	5133034	1226
146	PASSO_DEL_MORO	3086900	420822	5094426	2820
147	MACUGNAGA_PECETTO	3086901	419334	5091685	1360
148	MACUGNAGA_RIFUGIO_ZAMBO NI	3086906	416151	5089413	2075
149	CANDOGLIA_TOCE	3096900	455291	5091605	201
150	MOMO_AGOGNA	3100900	464790	5046697	213

151	LARECCHIO	3101901	456225	5117160	1860
152	NEBBIUNO	3103900	461722	5075088	865
153	NOVARA_AGOGNA	3106700	468063	5031113	146
154	NOVARA	3106900	471388	5032237	151
155	OMEGNA_LAGO_D'ORTA	3110900	454220	5080460	292
156	PARUZZARO	3114900	462140	5066473	332
157	FOMARCO	3118900	443240	5094961	252
158	PREMIA	3124900	451503	5128211	755
159	MOTTARONE_-_BAITA_CAI	3142900	457172	5081082	1302
160	SOMERARO	3142901	462213	5082028	425
161	MOTTARONE	3142902	457689	5081238	1491
162	ARVOGNO	3145900	458123	5113049	1240
163	MONTE_CARZA	3147900	475300	5099029	1110
164	TRASQUERA	3148900	438833	5118446	1145
165	MOTTAC	3150900	454003	5101241	1695
166	SAMBUGHETTO	3151900	446665	5084060	742
167	VARALLO_POMBIA	3154900	471170	5058127	268
168	VARZO	3155900	437878	5122296	1308
169	ALPE_VEGLIA	3155901	433921	5125172	1740
170	PALLANZA	3156900	465093	5085916	202
171	UNCHIO_TROBASO	3156902	463782	5089947	302
172	ACCEGLIO	4001900	339567	4927939	1610
173	ACCEGLIO_COLLET	4001901	333703	4931975	2010
174	ALBA_TANARO	4003900	423047	4950863	172
175	ARGENTERA	4006900	335978	4918048	1680
176	BALDISSERO_D'ALBA	4010900	414707	4956203	265
177	BARGE	4012900	361481	4954853	961
178	BELLINO	4017900	339936	4937921	1805
179	BELVEDERE_LANGHE	4018900	418603	4928137	550
180	BOVES	4028900	385442	4910296	575
181	BRA	4029900	409096	4950597	285
182	UPEGA	4031900	398111	4887247	1310
183	PIAGGIA	4031901	398488	4880823	1645
184	BROSSASCO	4033900	370918	4936473	580
185	CANOSIO	4038900	347840	4924337	1220
186	GARDETTA	4038901	341793	4919440	2337
187	CARRU'_PESIO	4043700	411221	4924307	275
188	CASTELLETTO_UZZONE	4050900	435529	4927156	423
189	CASTELLINALDO	4051900	423075	4958076	325
190	CASTELMAGNO	4053900	354208	4918133	1755
191	CEVA	4066900	421761	4915442	410
192	CHIUSA_PESIO	4068900	393085	4898867	935
193	COSTIGLIOLE_SALUZZO	4075900	380628	4935110	440



194	CRISSOLO	4077900	353809	4951592	1318
195	PIAN_GIASSET	4077901	351790	4950356	2150
196	CUNEO_CASCINA_VECCHIA	4078900	382741	4914224	575
197	CUNEO_CAMERA_COMMERCIO	4078901	384371	4916196	550
198	S_GIACOMO_DEMONTE	4079901	356860	4912030	1297
199	DEMONTE	4079902	365481	4908591	765
200	ABELLONI_CHERASCA	4080900	424193	4946218	210
201	DRONERO	4082900	373632	4923430	575
202	ELVA	4083900	348294	4934502	1770
203	DIGA_DEL_CHIOTAS	4084900	366881	4891327	2020
204	DIGA_LA_PIASTRA	4084901	371391	4898519	950
205	FARIGLIANO_TANARO	4086900	412790	4930094	263
206	FEISOGGIO	4088900	429551	4933078	770
207	FOSSANO	4089900	403729	4932637	403
208	MONTE_MALANOTTE	4091900	403783	4901595	1735
209	BORELLO	4091901	406884	4897585	1005
210	COLLE_SAN_BERNARDO	4095901	423980	4892286	980
211	MONTE_BERLINO	4095902	414855	4895385	1765
212	GOVONE	4099900	429922	4959859	310
213	LIMONE_PANCANI	4110901	387341	4890901	1875
214	MANGO	4115900	432530	4951081	425
215	MARENE	4117900	399568	4947072	310
216	MOMBASIGLIO_MONGIA	4125900	417577	4913468	452
217	MONDOVI'	4130900	405350	4916698	422
218	FRABOSA_SOPRANA_CORSAGLIA	4134900	407216	4903242	683
219	MONTEROSSO_GRANA	4139700	366665	4918908	720
220	MOROZZO	4144900	395961	4919317	440
221	PONTE_DI_NAVA_TANARO	4155901	409472	4885763	840
222	PAESANA	4157900	362370	4947015	1265
223	PAESANA_ERASCA	4157901	362475	4949299	638
224	PAMPARATO	4159900	412659	4904107	975
225	PAROLDO	4160900	426972	4921992	810
226	PERLO	4162900	427006	4909165	700
227	PRADEBONI	4163900	391476	4906152	985
228	PONTECHIANALE	4172900	345555	4941889	1575
229	COLLE_DELL'AGNELLO	4172902	339885	4949696	2685
230	PRIERO	4175900	429031	4914348	610
231	PRUNETTO	4178900	433557	4929030	751
232	ROBILANTE_VERMENAGNA	4185900	381736	4902250	751
233	RIFUGIO_MONDOVI'	4190900	398757	4894142	1760
234	ROCCAFORTE_MONDOVI'	4190901	399915	4907260	595
235	RODDINO	4195900	421386	4936815	500
236	RODELLO	4196900	424991	4943560	415

237	BERGALLI	4201900	434957	4917579	385
238	SALUZZO	4203900	379371	4943428	535
239	PIAN_DELLE_BARACCHE	4205900	351816	4934725	2135
240	SAN_DAMIANO_MACRA	4207900	360992	4929871	1095
241	AEROPORTO_CUNEO_LEVALDIGI	4215900	389764	4932725	382
242	SOMANO	4221900	422019	4932623	626
243	TREISO	4230900	427326	4947726	376
244	VALDIERI	4233900	361709	4896272	1390
245	ANDONNO_GESSO	4233901	375159	4905569	712
246	PALANFRE'	4239900	379312	4894654	1625
247	VILLANOVA_SOLARO	4246900	386845	4954671	267
248	COLLE_LOMBARDA	4248900	352095	4896831	2305
249	NERAISSA	4248901	352702	4909786	1433
250	VINADIO_S_BERNOLFO	4248902	343935	4902986	1695
251	VINADIO_STURA_DI_DEMONTE	4248903	349707	4907393	955
252	VIOLA	4249900	416610	4904372	1050
253	ASTI_TANARO	5005900	437873	4970662	117
254	ASTI	5005901	436154	4974320	175
255	BUTTIGLIERA_D'ASTI	5012900	416001	4985910	290
256	CASTAGNOLE_LANZE	5022901	435061	4955861	383
257	CASTELL'ALFERO	5025900	438822	4982122	140
258	LOAZZOLO	5060900	439310	4947239	600
259	MOMBALDONE_BORMIDA_Q.A.	5064700	447287	4935480	187
260	MONTALDO_SCARAMPI	5074900	441508	4964453	295
261	MONTECHIARO_D'ASTI	5075900	429242	4984323	200
262	NIZZA_MONFERRATO	5080900	448319	4957203	138
263	ROCCAVERANO	5094900	444625	4940132	640
264	SAN_DAMIANO_BORBORE	5097900	427500	4966004	154
265	SEROLE_BRIC_PUSCHERA	5104900	441174	4934872	765
266	TONENGO	5110900	421859	4996460	480
267	ACQUI_TERME	6001900	458845	4947584	215
268	ALESSANDRIA_LOBBI	6003900	476727	4976201	90
269	ARQUATA_SCRIVIA	6009900	490646	4947889	325
270	BASALUZZO	6012900	474833	4956759	128
271	CAPANNE_MARCAROLO	6022900	481677	4934651	780
272	BRIGNANO_FRASCATA	6024900	502476	4961288	512
273	CAPANNE_DI_COSOLA	6025900	515945	4947126	1550
274	CABELLA_LIGURE	6025901	507377	4946916	480
275	PIANI_DI_CARREGA	6034900	514956	4940241	1245
276	LAVAGNINA_LAGO	6038900	480616	4939369	356
277	CASALE_MONFERRATO	6039900	461092	4997958	118
278	CASTELLANIA	6045900	494634	4960771	390
279	CALDIROLA	6067900	512080	4951835	1190

280	FRACONALTO	6069900	490535	4937821	725
281	GARBAGNA	6079900	499447	4959186	420
282	GAVI	6081900	483932	4949150	215
283	ISOLA_S._ANTONIO	6087900	488564	4985460	77
284	MASIO_TANARO	6091900	453525	4969048	105
285	NOVI_LIGURE	6114900	480884	4959362	162
286	OVADA	6121900	471188	4944033	230
287	PARETO	6125900	451556	4930821	525
288	PONZONE_BRIC_BERTON	6136900	463454	4929755	773
289	PONZONE_CIMAFERLE	6136901	459757	4933690	693
290	ROCCAFORTE_LIGURE	6146900	501905	4947444	770
291	SAN_SALVATORE_MONFERRATO	6154900	465907	4982455	251
292	SARDIGLIANO	6157900	492695	4956060	320
293	CREA	6159900	443245	4993811	385
294	SEZZADIO	6161900	465851	4959096	110
295	SPINETO_SCRIVIA	6166900	489720	4964473	187
296	CASTELLAR_PONZANO	6174900	487962	4963974	146
297	VIGNALE_MONFERRATO	6179900	453465	4985357	308
298	AYAS_ALPE_AVENTINE	7007900	400189	5080783	2073
299	AYMAVILLES-VIEYES	7008900	363786	5056816	1139
300	BIONAZ-PLACE_MOULIN	7010900	383099	5084205	1979
301	BRUSSON-EXTRAPIERAZ	7012901	398830	5070678	1380
302	CHAMOIS-LAGO_DI_LOU	7016900	393147	5077893	2020
303	CHAMPDEPRAZ-CHEVRERE	7017900	392103	5060011	1260
304	CHAMPORCHER-RIFUGIO_DONDENA	7018900	387168	5052194	2181
305	COGNE-LILLAZ_CENTRALE	7021900	374621	5050540	1613
306	COGNE-VALNONTEY	7021901	370379	5049553	1682
307	COGNE_GRAND_CROT	7021903	372945	5049915	2279
308	COURMAYEUR-LEX_BLANCHE	7022900	331991	5070560	2162
309	COURMAYEUR-PRE'DE_BARD	7022901	349915	5083135	2040
310	COURMAYEUR-MONT_DE_LA_SAXE	7022902	343178	5075812	2076
311	COURMAYEUR-FERRACHE	7022903	347089	5081287	2290
312	LAVODILEC	7027900	381936	5055786	2250
313	FENIS-CLAVALITE	7027901	383024	5060488	1531
314	PILA_LEISSE	7031900	368343	5058342	2280
315	GRESSONEY-_L.T._-ESELBODE	7032900	408890	5076090	1642
316	GRESSONEY-L.T.-GABIET	7032901	410705	5078465	2379
317	GRESSONEY-S.J.-WEISSMATTEN	7033901	408692	5066969	2038
318	ISSIME-CAPOLUOGO-LYS	7036900	411019	5060138	960
319	LA_THUILE-VILLARET	7041900	340981	5063942	1488
320	LA_THUILE-LA_GRAN_TETE	7041901	337727	5061120	2430

321	LA_THUILE-FOILLEX	7041902	342193	5064835	2042
322	LILLIANES-GRANGES	7042900	410936	5053543	1256
323	MORGEX-LAVANCHER_NIVO	7044901	346042	5073407	2842
324	NUS-PORLIOD	7045900	382973	5073325	1890
325	OLLOMONT-BY	7046900	368218	5082478	2017
326	POLLEIN-DORA_BALTEA	7049900	372489	5066184	545
327	PONTBOSET-FOURNIER	7050900	397138	5051162	1087
328	PONTEY-_DORA_BALTEA	7051900	392534	5066380	445
329	PRE-ST-DIDIER-PLAN_PRAZ	7053900	340864	5069401	2044
330	RHEMES-SG-DORA_DI_RHEMES	7056900	356133	5056984	1179
331	ST._RHEMY- CREVACOL_ARP_DE_JEUX	7064900	356850	5076908	2018
332	COLLE_GRAND_S.BERNARDO	7064901	356688	5081296	2360
333	VALGRISENCHE-MENTHIEU	7068900	348237	5053168	1859
334	VALPELLINE-CHOZOD	7069900	371116	5076358	1029
335	VALSAVARENCHÉ-MOLÈRE- SAVARA	7070900	359984	5056618	1160
336	CAIRO_MONTENOTTE	9015900	442673	4915502	388
337	MONTENOTTE_INFERIORE	9015901	453196	4917300	564
338	CALIZZANO	9017900	429680	4898688	647
339	SETTEPANI	9017901	435781	4898625	1375
340	MALLARE	9036900	444192	4904195	467
341	MURIALDO_BORMIDA_DI_MILLE SIMO	9040900	432952	4906183	523
342	OSIGLIA	9046900	436589	4904264	620
343	SASSELLO	9055900	459016	4924790	385
344	PIAMPALUDO	9055901	466585	4922864	882
345	BUSALLA	10006900	495830	4934073	358
346	ALPE_GORRETO	10026900	518758	4939746	915
347	BARBAGELATA	10030900	519310	4924690	1100
348	ROSSIGLIONE	10051900	472982	4936010	289
349	ROVEGNO	10052900	522011	4935992	650
350	ALPE_VOBBIA	10066900	506175	4935957	1082
351	ANGERA	12003900	467283	5069724	262
352	ARCISATE	12004900	491502	5077175	370
353	BUSTO_ARSIZIO	12026900	486271	5052710	242
354	CUVEGLIO	12062900	480051	5084732	310
355	PONTE_VEDANO	12091900	489872	5069647	360
356	LUINO	12092900	480211	5094145	230
357	VARESE	12133900	486299	5075301	404
358	MILANO	15146901	519541	5035782	122
359	FORTUNAGO	18064900	515392	4973619	483
360	LOMELLO	18083900	484116	4996240	98
361	PAVIA	18110900	511894	5003761	77

<b>362</b>	ROMAGNESE	18128900	526365	4966125	589
<b>363</b>	CASANOVA	18142900	519209	4958571	757
<b>364</b>	VARZI	18171900	515657	4964208	410
<b>365</b>	VIGEVANO	18177900	490641	5020699	111
<b>366</b>	VOGHERA	18182900	501379	4983012	103
<b>367</b>	BETTOLA	33004900	550095	4960619	618
<b>368</b>	RIGLIO	33004901	553491	4964412	432
<b>369</b>	PERINO	33016900	539416	4964310	250
<b>370</b>	SELVA_FERRIERE	33020901	538298	4937950	1135
<b>371</b>	CASSIMORENO	33020902	545953	4943647	885
<b>372</b>	SALSOMINORE	33020903	532383	4943565	421
<b>373</b>	GROPPARELLO	33025900	557444	4964446	359
<b>374</b>	SAN_MICHELE	33028900	556148	4956904	670
<b>375</b>	TERUZZI	33028901	554255	4949358	1110
<b>376</b>	BOBBIANO	33043900	538855	4969953	567
<b>377</b>	CASE_BONINI	33044900	561402	4956952	366
<b>378</b>	MONCENISIO_LAGO	215000900	338644	5009846	2000

## 13.2 ESEMPIO DI OUTPUT DEL GIS

L'output del Gis presentava le seguenti convenzioni.

- -31.50: non c'è segnale di ritorno, quindi il cielo è sereno.
- 95.50: la stazione è fuori dal raggio del radar.
- 96.00: misura non pervenuta.

Tab. 20-Esempio di output del Gis					
DATA	ORA	STAZIONE	UTM E	UTM N	dBZ
20060706	0000	1003900	367642	5019242	0.00
20060706	0010	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0020	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0030	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0040	1003900	367642	5019242	-1.00
20060706	0050	1003900	367642	5019242	0.00
20060706	0100	1003900	367642	5019242	0.00
20060706	0110	1003900	367642	5019242	21.00
20060706	0120	1003900	367642	5019242	37.00
20060706	0130	1003900	367642	5019242	6.50
20060706	0140	1003900	367642	5019242	-9.50
20060706	0150	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0200	1003900	367642	5019242	-7.00
20060706	0210	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0220	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0230	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0240	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0250	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0300	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0310	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0320	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0330	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0340	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0350	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0400	1003900	367642	5019242	-5.00
20060706	0410	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0420	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0430	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0440	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0450	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0500	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0510	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0520	1003900	367642	5019242	-31.50

20060706	0530	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0540	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0550	1003900	367642	5019242	-4.50
20060706	0600	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0610	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0620	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0630	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0640	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0650	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0700	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0710	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0720	1003900	367642	5019242	-3.50
20060706	0730	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0740	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0750	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0800	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0810	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0820	1003900	367642	5019242	1.50
20060706	0830	1003900	367642	5019242	32.50
20060706	0840	1003900	367642	5019242	27.00
20060706	0850	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0900	1003900	367642	5019242	
20060706	0910	1003900	367642	5019242	
20060706	0920	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	0930	1003900	367642	5019242	
20060706	0940	1003900	367642	5019242	
20060706	0950	1003900	367642	5019242	
20060706	1000	1003900	367642	5019242	
20060706	1010	1003900	367642	5019242	
20060706	1020	1003900	367642	5019242	
20060706	1030	1003900	367642	5019242	15.50
20060706	1040	1003900	367642	5019242	
20060706	1050	1003900	367642	5019242	13.50
20060706	1100	1003900	367642	5019242	24.50
20060706	1110	1003900	367642	5019242	19.50
20060706	1120	1003900	367642	5019242	17.50
20060706	1130	1003900	367642	5019242	4.50
20060706	1140	1003900	367642	5019242	2.50
20060706	1150	1003900	367642	5019242	22.50
20060706	1200	1003900	367642	5019242	46.00
20060706	1210	1003900	367642	5019242	24.50
20060706	1220	1003900	367642	5019242	20.00
20060706	1230	1003900	367642	5019242	21.00

20060706	1240	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1250	1003900	367642	5019242	-18.50
20060706	1300	1003900	367642	5019242	18.00
20060706	1310	1003900	367642	5019242	27.00
20060706	1320	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1330	1003900	367642	5019242	10.50
20060706	1340	1003900	367642	5019242	23.00
20060706	1350	1003900	367642	5019242	33.50
20060706	1400	1003900	367642	5019242	26.50
20060706	1410	1003900	367642	5019242	17.00
20060706	1420	1003900	367642	5019242	21.50
20060706	1430	1003900	367642	5019242	11.50
20060706	1440	1003900	367642	5019242	24.50
20060706	1450	1003900	367642	5019242	31.50
20060706	1500	1003900	367642	5019242	34.00
20060706	1510	1003900	367642	5019242	16.50
20060706	1520	1003900	367642	5019242	11.00
20060706	1530	1003900	367642	5019242	5.50
20060706	1540	1003900	367642	5019242	3.00
20060706	1550	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1600	1003900	367642	5019242	-6.50
20060706	1610	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1620	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1630	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1640	1003900	367642	5019242	-1.00
20060706	1650	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1700	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1710	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1720	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1730	1003900	367642	5019242	6.00
20060706	1740	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1750	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1800	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1810	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1820	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1830	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1840	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1850	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1900	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1910	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1920	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1930	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	1940	1003900	367642	5019242	-31.50



20060706	1950	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2000	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2010	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2020	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2030	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2040	1003900	367642	5019242	-3.50
20060706	2050	1003900	367642	5019242	-1.00
20060706	2100	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2110	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2120	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2130	1003900	367642	5019242	-13.00
20060706	2140	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2150	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2200	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2210	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2220	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2230	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2240	1003900	367642	5019242	-5.00
20060706	2250	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2300	1003900	367642	5019242	-7.00
20060706	2310	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2320	1003900	367642	5019242	-14.50
20060706	2330	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2340	1003900	367642	5019242	-31.50
20060706	2350	1003900	367642	5019242	-31.50

### 13.3 CONFRONTO GRAFICO TRA I RISULTATI OTTENUTI CON LA FORMULA DI JOSS E WALDVOGUEL E QUELLI DELLA COPPIA $a=198.19$ , $b=1.69$ DETERMINATA CON IL PROCESSO DI OTTIMIZZAZIONE NON-LINEARE

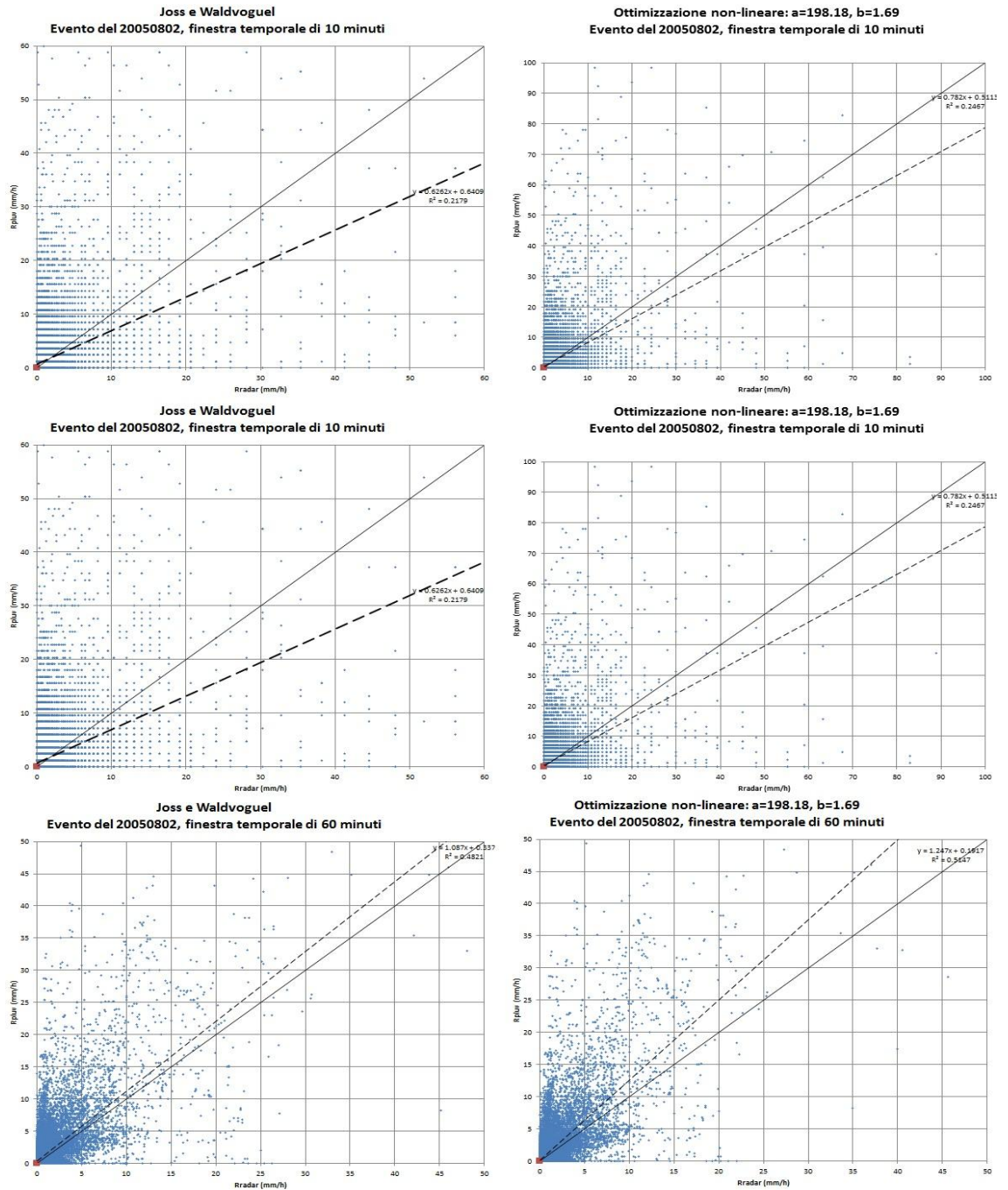
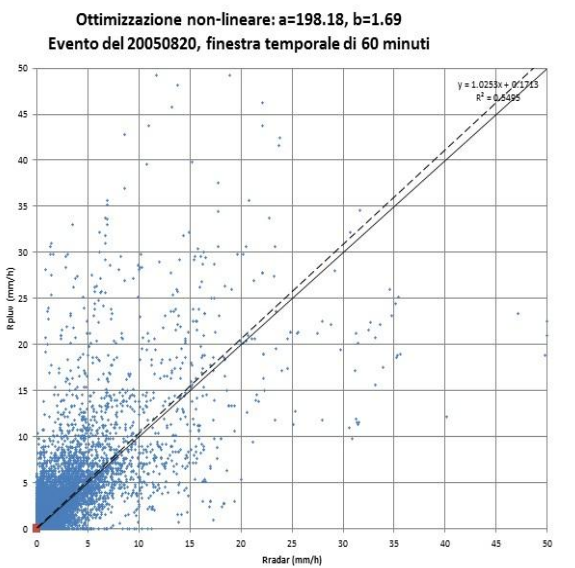
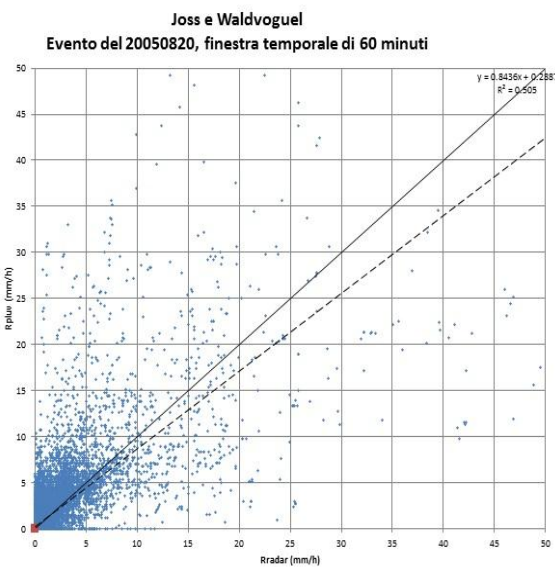
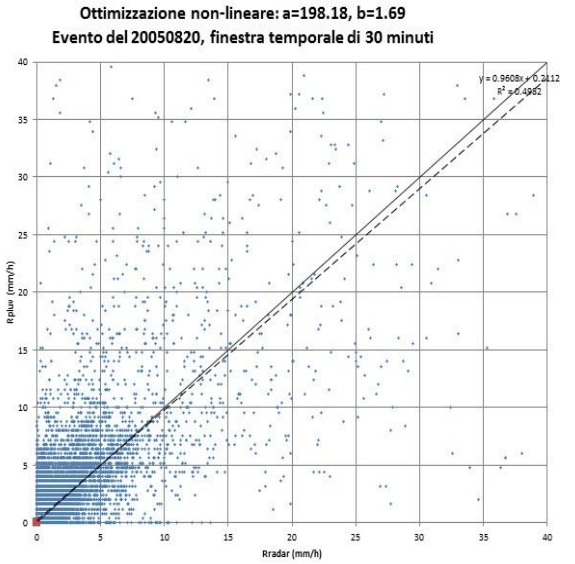
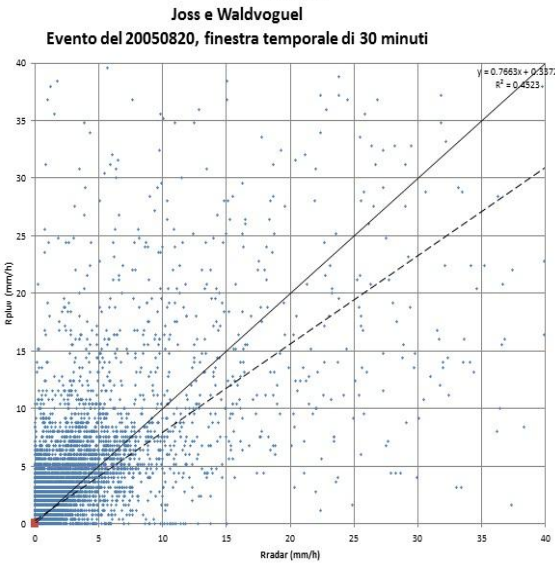
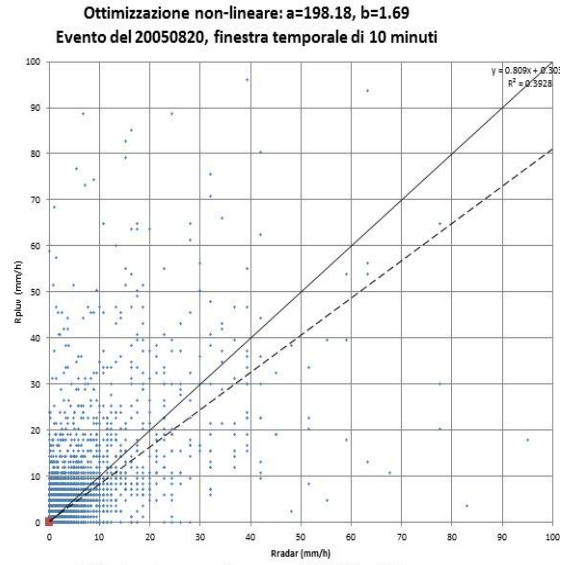
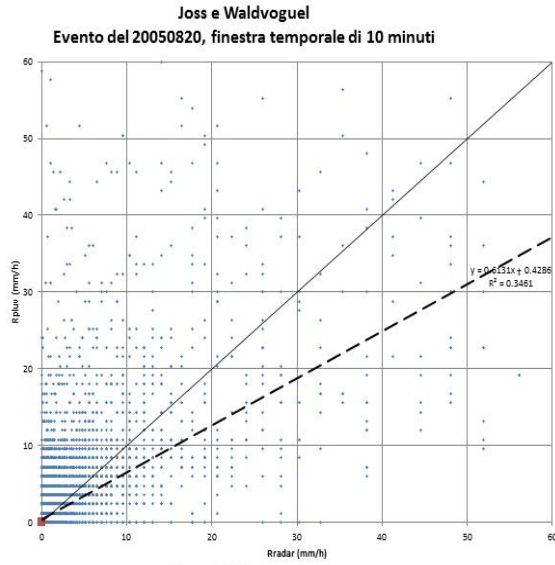
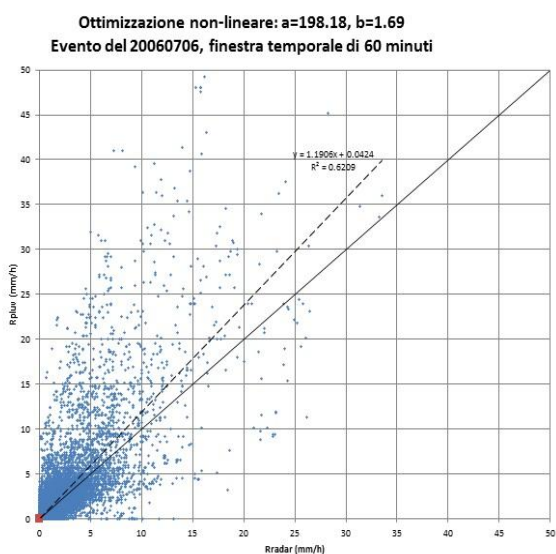
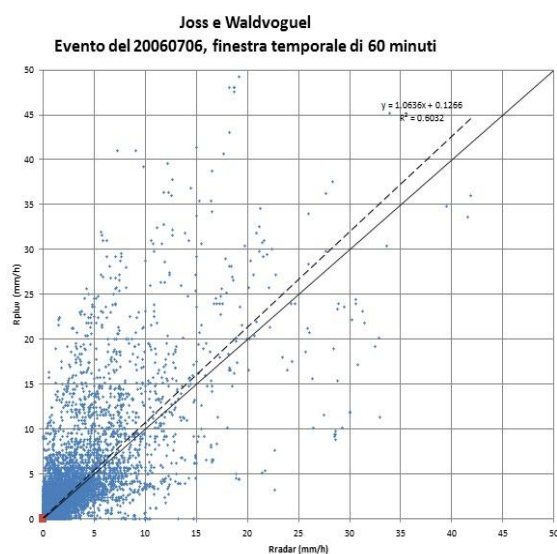
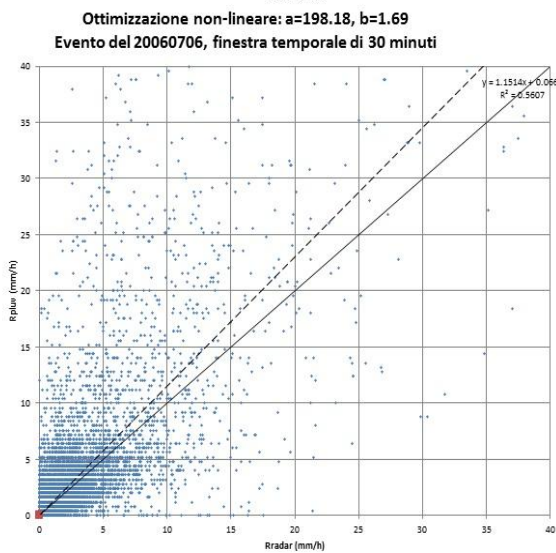
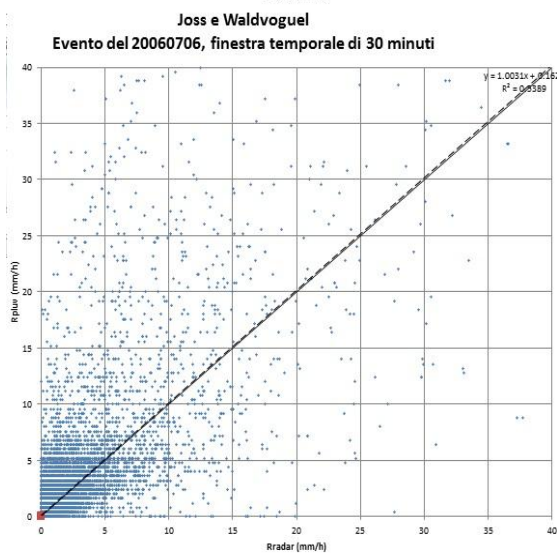
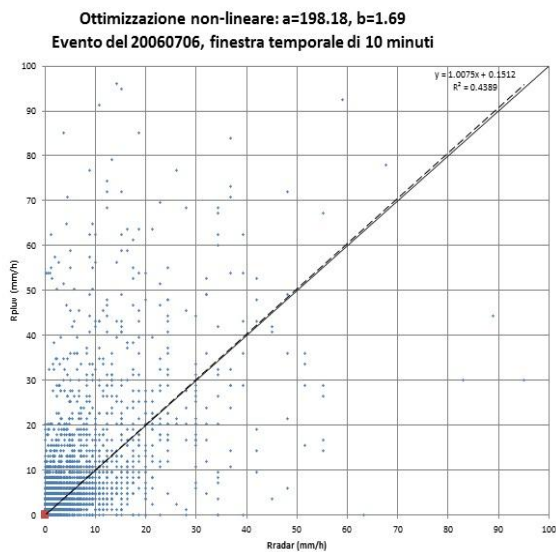
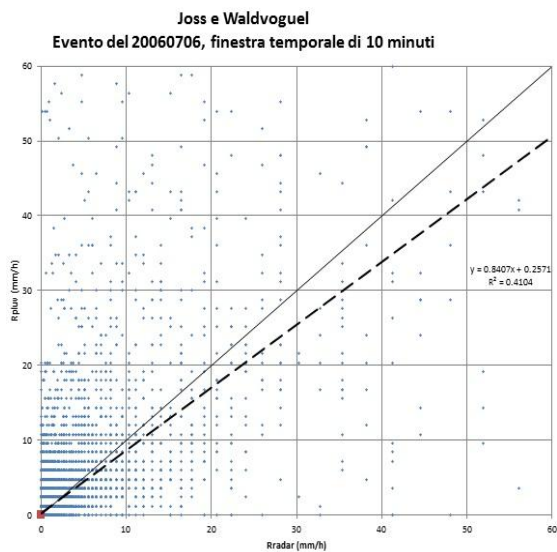


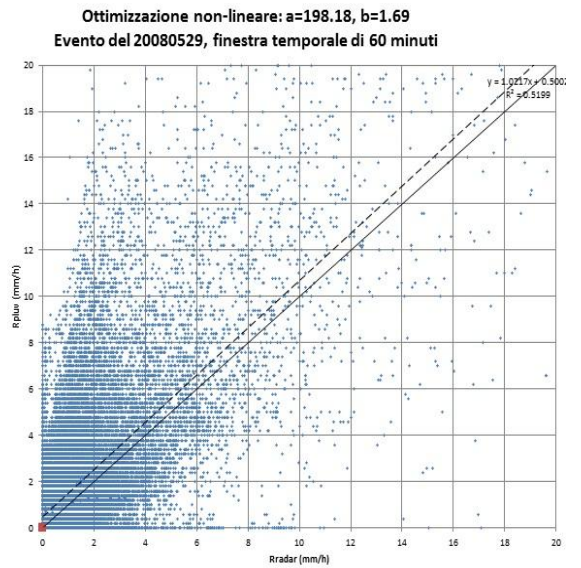
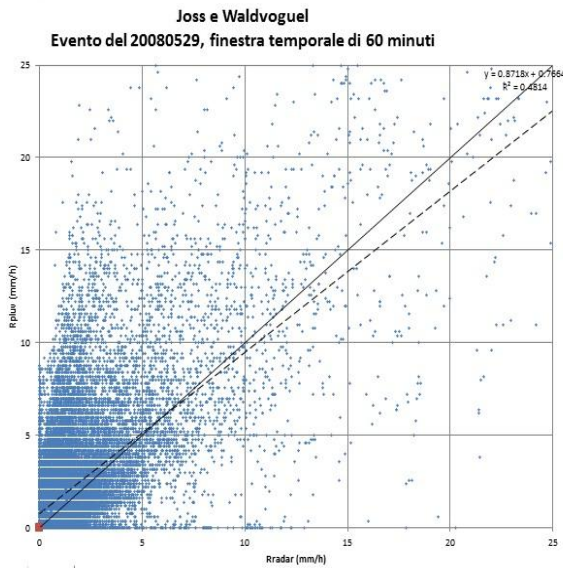
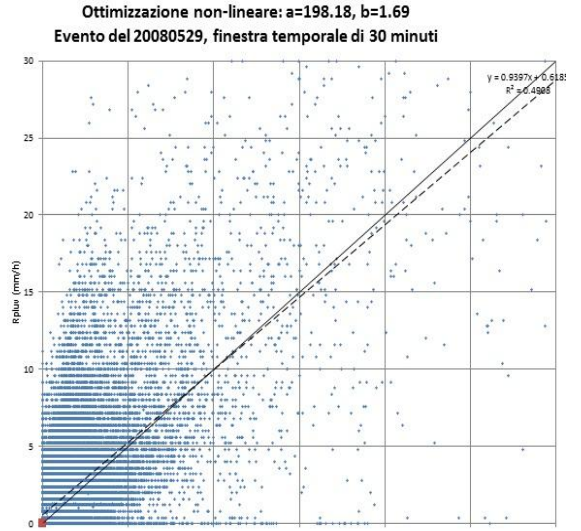
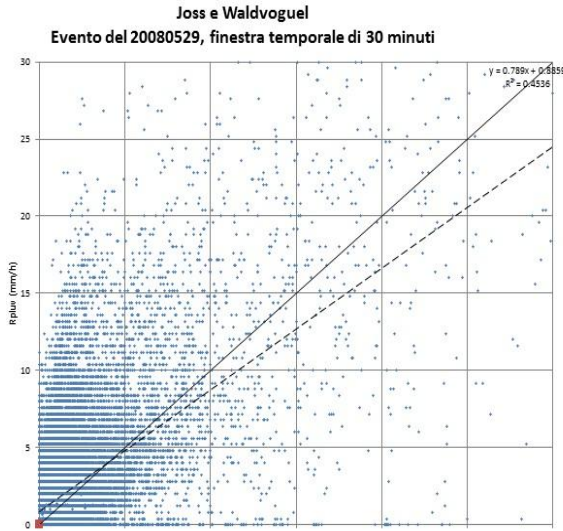
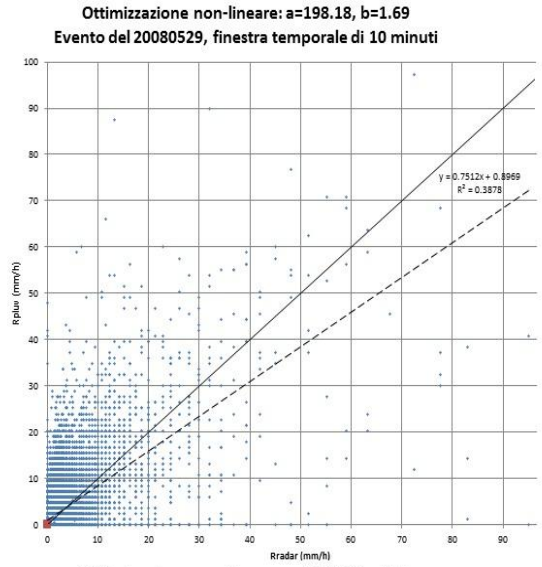
Fig. 17-Evento 20050802



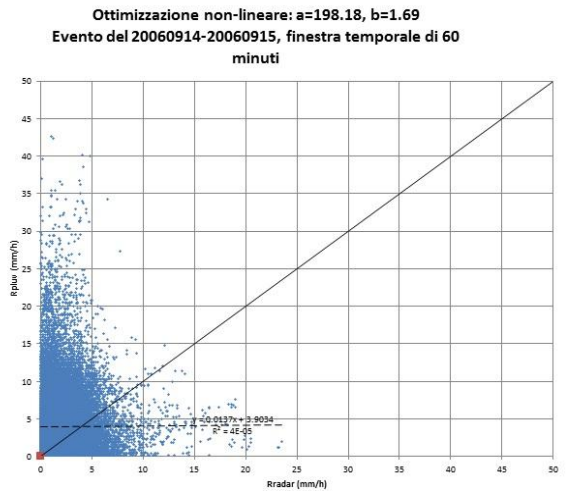
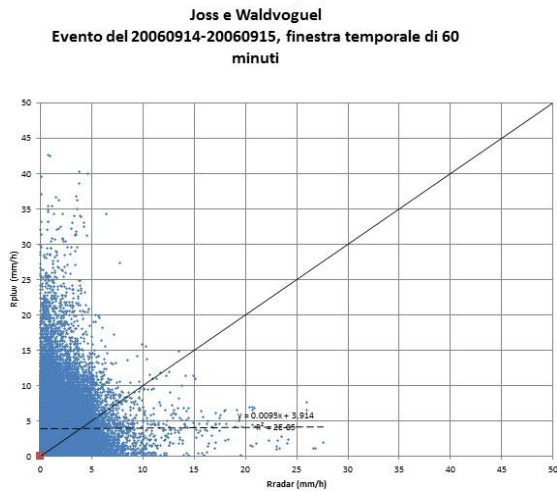
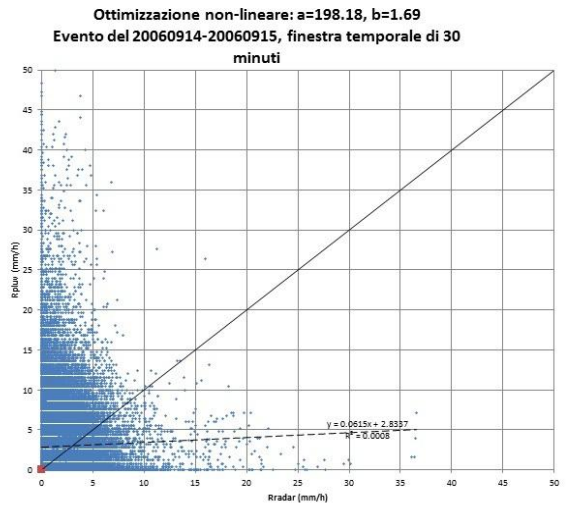
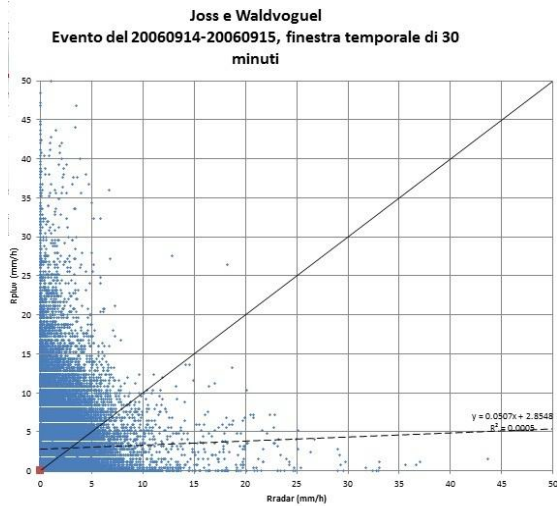
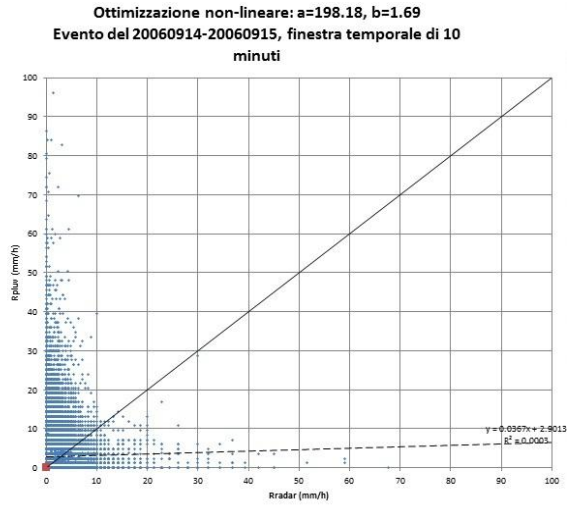
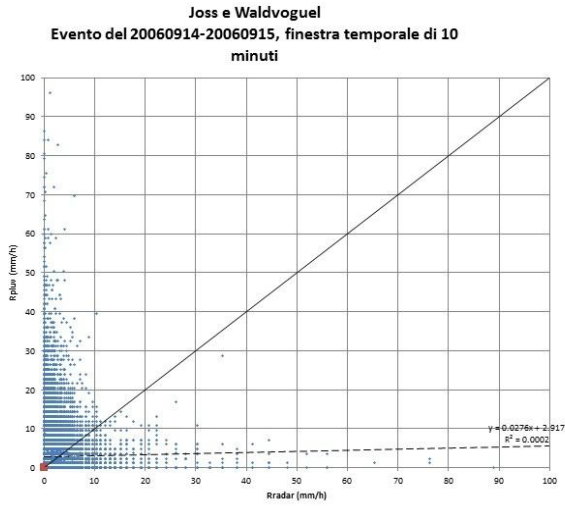
**Fig. 18-Evento 20050820**



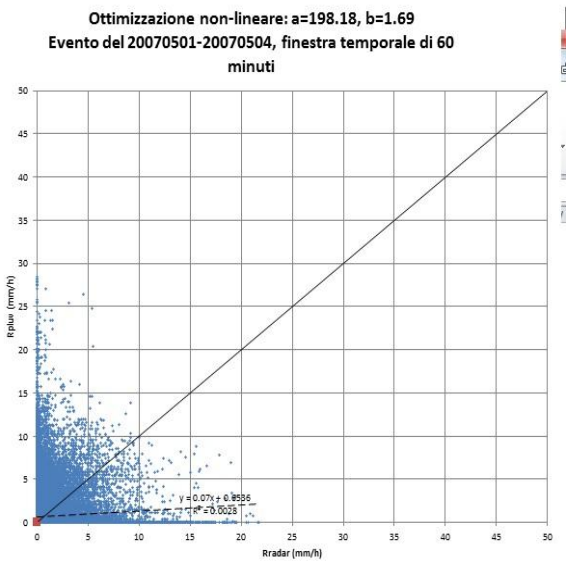
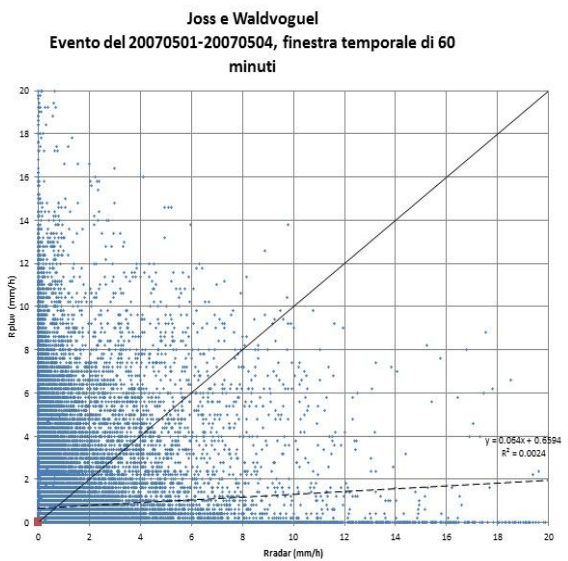
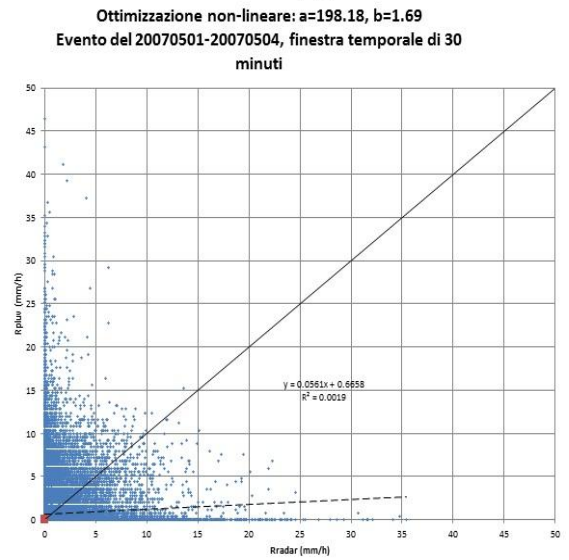
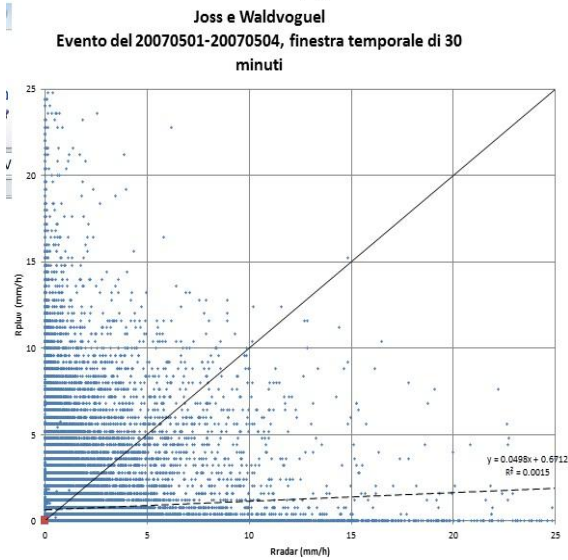
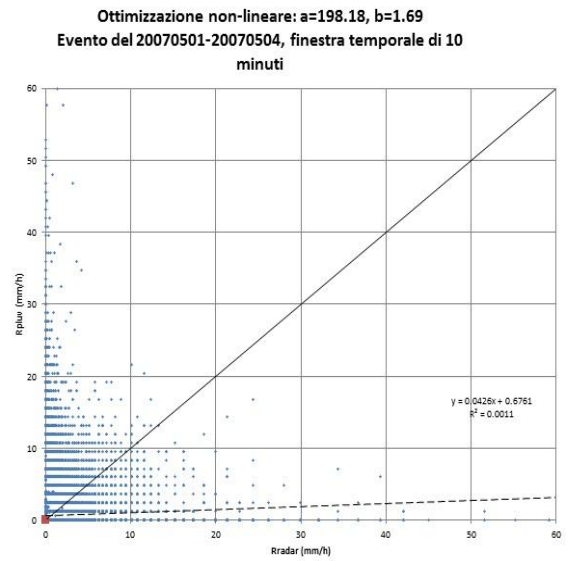
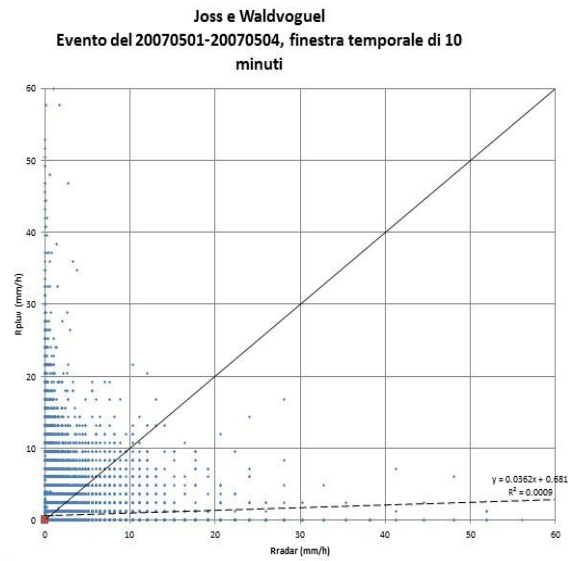
**Fig. 19-Evento 20060706**



**Fig. 20-Evento 20080529**



**Fig. 21-Evento 20060914-20060915**



**Fig. 22-Evento 20070501-20070504**

## 14 FONTI

L. Alfieri, P. Claps, F. Laio, *Time-dependent Z-R relationships for estimating rainfall fields from radar measurements*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 26 January 2010, p. 151.

Joss, J. and Waldvogel, A.: *A method to improve the accuracy of radar-measured amounts of precipitation*, in: Preprints, 14<sup>th</sup> Radar Meteorology Conf., Tucson, AZ, 237-238, 1970.

Marshall, J.S. and Palmer, W.M., *The distribution of raindrops with size*, J. Meteorol., 5, 165-166, 1948.

Remko Uijlenhoet, *Raindrop size distributions and radar reflectivity–rain rate*, Hydrology and Earth System Sciences, 5(4), 615–627, 2001.

Kamil S. Ali and Medhat H. Said, *Determination of Radar Z-R Relationship For Libya – Tripoli City*, Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol I, 2009.

Nelson, Brian R., D.-J. Seo, and D. Kim, 201, *Multisensor Precipitation Reanalysis*, J. Hydrometeor., 11, 666–682.

Matteo Carazzo, *Selezione di eventi di precipitazione estrema di breve e lunga durata sulla Regione Piemonte*, Tesi di laurea specialistica in Ingegneria Civile, Torino, A. A. 2009-2010.

Pasquale Erto, *Probabilità e statistica per le scienze e l'ingegneria*, seconda edizione, Milano, McGraw-Hill, 2004.

[www.arpa.piemonte.it](http://www.arpa.piemonte.it)

[www.fenomenitemporaleschi.it](http://www.fenomenitemporaleschi.it)

[www.thunderstormteam.it](http://www.thunderstormteam.it)

CARLO BARTOLINI



## 15 RINGRAZIAMENTI

Con queste ultime righe si dovrebbe concludere il lungo periodo universitario, che cominciò nel 2001 con la laurea in storia. A ben vedere si chiude un capitolo della vita cominciato a 6 anni. Era ora.

Si ringrazia

- L'ing. Elena Toth dell'università di Bologna (mia correlatrice sia in questa tesi, sia in quella triennale), non solo per le (non) poche e sempre precise indicazioni, ma anche per la brillante idea di svolgere la tesi presso un'azienda di Torino, visto il mio interesse a trasferirmi.
- Gli ingegneri Paola Allamano e Francesco Laio del *Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Infrastrutture Civili (DITIC) del Politecnico di Torino* per la collaborazione e l'aiuto offertomi nell'esecuzione della tesi.
- Il dottor Enrico Gallo, per la disponibilità mostrata riguardo all'utilizzo dei programmi sul server del Politecnico.
- Il dottor Roberto Cremonini, che ha permesso lo svolgimento della mia attività presso *ARPA Piemonte*.

- 
- Mia sorella, mia zia e i miei genitori: gli "sponsor ufficiali" di Carlo Bartolini (diffidate delle imitazioni)
  - Cecilia: una delle prime persone conosciute a Bologna e vera amicizia. E ringrazio anche casa sua, per tutte le volte che mi ha ospitato. Altre seguiranno...
  - Laurent: mio migliore amico e compagno di pazzesche avventure, oltre che epicureo scroccone dalla vastissima cultura! Vedrai che da qui in avanti non dirò più: "non posso, devo studiare". Dirò: "non posso, devo lavorare", da quello stoico che sono. Ma lo dirò di meno.
  - Maria: Maria è Maria.
  - Giuseppe: una delle poche persone di sesso maschile con cui abbia socializzato durante l'Università, a parte i coinquilini e Laurent.

Eravamo un insolito trio. Quelle birre alla castagna, le discussioni politiche, quelle dopo un film al cinema e le “ragazze Loréal –perché io valgo!-”: mi mancano.

- Claudia
- Andreina
- Giulia
- Giuliano. È successo tutto grazie a lui davanti al pub di Aosta, con un “dai, perché non vieni a studiare a Bologna con noi?”
- Simone e Jacopo, 2 dei 3 migliori e storici coinquilini di via Nosadella.
- Diego, mio carissimo amico che mi salvò la vita.
- Umberto, Mathias e tutti gli amici del Liceo.
- Bologna, città che adoro e che sento mia.
- La Bicicletta: il mio fedele destriero d’acciaio. Mi ha accompagnato a Bologna, Torino, Milano, Verona, Aosta. Ovunque.
- Le fotocopisterie.
- I treni italiani: a me vanno bene e costano poco.

Nonché, ultima ma non ultima,

- Juliette