



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof. Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE
IN
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**MONITORAGGIO DEL SITO DA COLATE DI
DETRITI DEL RIO ACQUABONA (CORTINA
D'AMPEZZO, BL) NELL'ANNO 2016**

Relatore: prof. Paolo Scotton

Laureando: Enrico Valcanover

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

Ai miei genitori.

Sommario

All'interno di questa tesi sono riportate le attività di monitoraggio svolte fra aprile e ottobre 2016 nel sito da colate di detrito del Rio Acquabona, nel Comune di Cortina d'Ampezzo (BL), e le analisi dei dati ottenuti.

In particolare, si è scelto di studiare nel dettaglio le precipitazioni avvenute nel sito e valutare come queste influiscono sui fenomeni di colata o di scorrimento. Per fare ciò si è fatto ricorso al sistema di monitoraggio del Rio Acquabona che, con varie modifiche è in uso dal 1997. La strumentazione utilizzata durante il 2016 è composta da tre pluviometri a basculante, posti a diverse quote all'interno dell'area di studio, e di una stazione di valle, situata sul bordo del canale di colata, equipaggiata con una telecamera. Dall'anno prossimo sarà presente anche una nuova stazione intermedia che viene descritta all'interno di questo elaborato.

I dati sulle precipitazioni raccolti dai pluviometri sono stati analizzati sia in maniera unitaria su tutto il periodo, sia distinguendo ogni singolo evento di precipitazione e analizzando i più significativi.

I dati sulle precipitazioni sono stati poi analizzati congiuntamente alle informazioni disponibili sugli eventi di colata e di scorrimento avvenuti nel canale in studio e in quello adiacente, utilizzando, per gli eventi avvenuti nel Rio Acquabona, le immagini acquisite dalla stazione di valle.

Abstract

In this thesis are reported the monitoring activities that took place between April and October 2016 in the debris-flow site of Rio Acquabona, near Cortina d'Ampezzo (BL), and the analysis of the collected data.

Particularly, It has been decided to study in detail the rainfall occurred in the site and to estimate how it affected the debris-flow and runoff phenomena. In order to do that, the monitoring system of Rio Acquabona was used. The instruments used during 2016 consisted in three tipping rain gauges placed at different heights and a downstream station, located on the left bank of the flowing channel, equipped with a camcorder. In the thesis it is also described the new intermediate station that will be used from next year.

Rainfall data collected by the rain gauges have been analysed both as a whole and subdivided into single events. Main rainfall events have been analysed in detail.

Besides rainfall data have then analysed together with information and images of the debris-flows and runoff phenomena occurred during the monitoring period collected by the downstream station.

Indice

Capitolo 1	Introduzione	1
Capitolo 2.	Il sito di monitoraggio	3
	2.1 Inquadramento geografico	3
	2.2 Inquadramento geologico	4
	2.3 Inquadramento geomorfologico	7
Capitolo 3	Il sistema di monitoraggio del Rio Acquabona	11
	3.1 Storia del sistema di monitoraggio del Rio Acquabona	11
	3.2 Il sistema di monitoraggio utilizzato nel 2016	15
	3.3 Sviluppi futuri: la nuova stazione intermedia	22
Capitolo 4	Attività di monitoraggio svolta nel 2016	27
Capitolo 5	Analisi degli eventi avvenuti durante il periodo di monitoraggio	37
	5.1 Eventi di precipitazione	38
	5.1.1 Trattamento dei dati	38
	5.1.2 Analisi dei dati di precipitazione sull'intero periodo di monitoraggio	39
	5.1.3 Analisi degli eventi di precipitazione più significativi avvenuti durante il periodo di monitoraggio	52
	5.2 Eventi con trasporto solido	73
	5.3 Confronto fra le precipitazioni del 2015 e del 2016	90
Capitolo 6	Conclusioni	97

Bibliografia	99
Ringraziamenti	101

Indice delle figure

<i>Figura 2.1</i>	<i>L'area di studio del rio Acquabona. Sono indicate le posizioni della bacino di ritenzione e della zona di alimentazione (immagine LANDSAT).</i>	3
<i>Figura 2.2</i>	<i>Dettaglio del sito del Rio Acquabona tratto dalla Carta Geologica d'Italia 1:50000, Foglio 29, Cortina d'Ampezzo. In basso sono riportati gli elementi della legenda attinenti all'area di studio (fonte: sito ISPRA).</i>	4
<i>Figura 2.3</i>	<i>Affioramento della Formazione di Travenanzes all'interno del canale del Rio Acquabona.</i>	5
<i>Figura 2.4</i>	<i>Le imponenti pareti formate dalla Formazione della Dolomia Principale che sovrastano il Rio Acquabona.</i>	6
<i>Figura 2.5</i>	<i>Il canale di scorrimento nella parte più a monte. Sulla destra si può notare la Formazione di Travenanzes.</i>	8
<i>Figura 2.6</i>	<i>Il canale di scorrimento nella parte più a valle.</i>	8
<i>Figura 2.7</i>	<i>Il bacino di accumulo dei sedimenti posto subito a monte della Strada Statale 51 Alemagna.</i>	9
<i>Figura 2.8</i>	<i>Gli argini artificiali costruiti nell'ultimo tratto del canale.</i>	9
<i>Figura 3.1</i>	<i>Le posizioni degli elementi del sistema di monitoraggio all'interno del sito del Rio Acquabona. SV indica la stazione di valle, PV il pluviometro di valle, PI il pluviometro intermedio e PM il pluviometro di monte (immagine LANDSAT).</i>	15
<i>Figura 3.2</i>	<i>Posizione della stazione di valle rispetto al canale.</i>	16
<i>Figura 3.3</i>	<i>La stazione di valle con gli elementi che la compongono. 1: armadio contenente la strumentazione di controllo; 2: ombreggiatore; 3: Cesta di contrappeso; 4: braccio metallico; 5: telecamera.</i>	18
<i>Figura 3.4</i>	<i>A sinistra il pluviometro intermedio con il suo pannello solare in posizione sul palo di sostegno in acciaio zincato; a destra lo stesso pluviometro aperto.</i>	19

<i>Figura 3.5</i>	<i>Il sistema di illuminazione e la telecamera in posizione all'interno del suo involucro.</i>	20
<i>Figura 3.6</i>	<i>La strumentazione contenuta all'interno dell'armadio della stazione di valle. 1: router; 2: computer Helios; 3: disco rigido; 4: unità di continuità.</i>	21
<i>Figura 3.7</i>	<i>La posizione della stazione intermedia</i>	22
<i>Figura 3.8</i>	<i>La struttura e l'armadio della stazione intermedia.</i>	23
<i>Figura 3.9</i>	<i>La telecamera e il suo involucro che andranno ad equipaggiare la nuova stazione intermedia.</i>	25
<i>Figura 3.10</i>	<i>Il proiettore LED che verrà installato nella nuova stazione intermedia</i>	26
<i>Figura 3.11</i>	<i>L'unità di continuità della nuova stazione intermedia con le due batterie aggiuntive.</i>	26
<i>Figura 4.1</i>	<i>I tre pluviometri. Da sinistra: pluviometro di valle, pluviometro intermedio e pluviometro di monte.</i>	28
<i>Figura 4.2</i>	<i>Strumentazione della stazione di valle. Da sinistra: l'UPS, l'armadio con il disco rigido, il modem e i collegamenti, la telecamera e il faro.</i>	30
<i>Figura 4.3</i>	<i>La stazione di valle montata e in posizione</i>	31
<i>Figura 4.4</i>	<i>La colata di detriti del 15 giugno 2016 (immagine Vigili del Fuoco).</i>	31
<i>Figura 4.5</i>	<i>La struttura della stazione intermedia in posizione</i>	34
<i>Figura 5.1</i>	<i>Fotogramma acquisito presso la stazione di valle durante un evento notturno, il numero 50 del 13 luglio 2016, di intensità elevata.</i>	53
<i>Figura 5.2</i>	<i>Esempio di ietogramma rettangolare e triangolare (tratto da: ARTINA S. et alii, Sistemi di Fognatura – Manuale di Progettazione, Hoepli, 2001).</i>	68
<i>Figura 5.3</i>	<i>Esempio di ietogramma Sifalda (tratto da: ARTINA S. et alii, Sistemi di Fognatura – Manuale di Progettazione, Hoepli, 2001).</i>	69

<i>Figura 5.4</i>	<i>Esempio di ietogramma Desbordes (tratto da: ARTINA S. et alii, Sistemi di Fognatura – Manuale di Progettazione, Hoepli, 2001).</i>	70
<i>Figura 5.5</i>	<i>Esempio di ietogramma Chicago centrato (tratto da: ARTINA S. et alii, Sistemi di Fognatura – Manuale di Progettazione, Hoepli, 2001)</i>	72
<i>Figura 5.6</i>	<i>La colata di detriti del 15 giugno 2016 (Immagine Vigili del Fuoco).</i>	75
<i>Figura 5.7</i>	<i>Il canale di colata del rio Acquabona in corrispondenza della stazione di valle prima (a sinistra) e dopo (a destra) l'evento del 13 luglio 2016.</i>	78
<i>Figura 5.8</i>	<i>Evoluzione del canale del Rio Acquabona nelle immagini riprese dalla telecamera durante l'evento del 13 luglio 2016.</i>	79
<i>Figura 5.9</i>	<i>La colata di detriti del 4 agosto 2016 che ha raggiunto La Statale Alemagna (Immagine Vigili del Fuoco).</i>	82
<i>Figura 5.10</i>	<i>Il canale di colata del rio Acquabona in corrispondenza della stazione di valle prima (a sinistra) e dopo (a destra) l'evento del 17 settembre 2016.</i>	84
<i>Figura 5.11</i>	<i>Evoluzione del canale del Rio Acquabona nelle immagini riprese dalla telecamera durante l'evento del 17 settembre 2016.</i>	87

Indice delle tabelle

<i>Tabella 5.1</i>	<i>Dati utilizzati per la determinazione degli errori sul tempo dei dati acquisiti dai pluviometri</i>	39
<i>Tabella 5.2</i>	<i>Valori della massima intensità sul periodo di monitoraggio misurati nei tre pluviometri per differenti finestre temporali. Nel caso vi fossero due massimi uguali, il programma fornisce il primo in ordine temporale.</i>	42
<i>Tabella 5.3</i>	<i>Valori del coefficiente di determinazione R^2 e del coefficiente angolare della concordanza per diversi tempi di riferimento.</i>	44
<i>Tabella 5.4</i>	<i>Valori di media, coefficiente di variazione e momento del terzo ordine della intensità di precipitazione per i dati registrati nei tre pluviometri durante tutto l'anno per diversi periodi di riferimento.</i>	48
<i>Tabella 5.5</i>	<i>Parametri dell'evento 15.</i>	56
<i>Tabella 5.6</i>	<i>Parametri dell'evento 19.</i>	58
<i>Tabella 5.7</i>	<i>Parametri dell'evento 50.</i>	60
<i>Tabella 5.8</i>	<i>Parametri dell'evento 51.</i>	62
<i>Tabella 5.9</i>	<i>Parametri dell'evento 62.</i>	64
<i>Tabella 5.10</i>	<i>Parametri dell'evento 29 per un tempo di riferimento di due minuti.</i>	77
<i>Tabella 5.11</i>	<i>Parametri dell'evento 75 su base temporale di due minuti.</i>	85
<i>Tabella 5.12</i>	<i>Parametri $m(J)$, $CV(J)$ e $m_3(J)$ per i tempi di riferimento di dieci minuti, un'ora, dodici ore e tre giorni per le precipitazioni misurate nel 2015 e nel 2016.</i>	92

Indice dei grafici

<i>Grafico 5.1</i>	<i>Intensità di precipitazione su base temporale di 2 minuti e precipitazione cumulata durante il periodo di monitoraggio</i>	40
<i>Grafico 5.2</i>	<i>Intensità di precipitazione su base temporale di 3 giorni e precipitazione cumulata durante il periodo di monitoraggio.</i>	41
<i>Grafico 5.3</i>	<i>Valori della massima intensità sul periodo di monitoraggio misurati nei tre pluviometri per differenti finestre temporali.</i>	42
<i>Grafico 5.4</i>	<i>valori del coefficiente di determinazione, R^2, della concordanza, per diversi periodi di riferimento</i>	44
<i>Grafico 5.5</i>	<i>Esempi di grafici di concordanza fra il pluviometro di monte e quello di valle per diversi tempi di riferimento.</i>	45
<i>Grafico 5.6</i>	<i>Distribuzione della frequenza delle intensità di precipitazione per le basi temporali di 10 minuti e tre giorni.</i>	46
<i>Grafico 5.7</i>	<i>Frequenza cumulata di non superamento dei valori di intensità nei tre pluviometri per un intervallo di riferimento di 10 minuti.</i>	50
<i>Grafico 5.8</i>	<i>Intensità di precipitazione e cumulata dell'evento 15.</i>	56
<i>Grafico 5.9</i>	<i>Intensità di precipitazione e cumulata dell'evento 19.</i>	58
<i>Grafico 5.10</i>	<i>Intensità di precipitazione e cumulata dell'evento 50.</i>	60
<i>Grafico 5.11</i>	<i>Intensità di precipitazione e cumulata dell'evento 51.</i>	62
<i>Grafico 5.12</i>	<i>Intensità di precipitazione e cumulata dell'evento 62.</i>	64
<i>Grafico 5.13</i>	<i>Confronto adimensionale fra le distribuzioni di intensità dei vari eventi.</i>	66
<i>Grafico 5.14</i>	<i>Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per i cinque giorni precedenti l'evento di crollo del 20 maggio 2016.</i>	74

<i>Grafico 5.15</i>	<i>Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per la settimana precedente l'evento di colata del 15 giugno 2016.</i>	75
<i>Grafico 5.16</i>	<i>Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di due minuti dell'evento 29.</i>	77
<i>Grafico 5.17</i>	<i>Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per la settimana precedente l'evento del 13 luglio 2016.</i>	78
<i>Grafico 5.18</i>	<i>Intensità di precipitazione e trasporto di massa dell'evento del 13 luglio 2016 su base temporale di due minuti.</i>	80
<i>Grafico 5.19</i>	<i>Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per la settimana precedente l'evento di colata del 14 agosto 2016.</i>	82
<i>Grafico 5.20</i>	<i>Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per la settimana precedente l'evento del 17 settembre 2016.</i>	84
<i>Grafico 5.21</i>	<i>Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di due minuti dell'evento 75.</i>	85
<i>Grafico 5.22</i>	<i>Intensità di precipitazione e trasporto di massa dell'evento del 17 settembre 2016 su base temporale di due minuti.</i>	88
<i>Grafico 5.23</i>	<i>Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata registrati dal pluviometro di monte e da quello di valle nel 2015 e nel 2016.</i>	91
<i>Grafico 5.24</i>	<i>Distribuzione della frequenza delle intensità di precipitazione per le basi temporali di dieci minuti e un'ora, 12 ore e 3 giorni, nel 2015 e nel 2016.</i>	94
<i>Grafico 5.25</i>	<i>Concordanza fra i pluviometri di monte e di valle su base temporale di dieci minuti, un'ora, dodici ore e tre giorni nel 2015 e nel 2016.</i>	95

Elenco dei simboli

Simbolo		Unità di misura
E_a	Errore assoluto	h
E_r	Errore relativo	h
t_v	Tempo vero	h
t_p	Tempo indicato dal pluviometro	h
t_{in}	Tempo di inizio acquisizione	h
J	Intensità di precipitazione	mm/h
J_{max}	Precipitazione massima	mm/h
R^2	Coefficiente di determinazione	
m	Coefficiente angolare	
$f(J_i)$	Frequenza delle intensità di precipitazione	
n_i	Numerosità di un valore di J all'interno del campione	
N	Numerosità totale del campione	
$m(J)$	Momento del primo ordine della distribuzione delle intensità	mm/h
$m_2(J)$	Momento del secondo ordine della distribuzione delle intensità	$(\text{mm/h})^2$
$s(J)$	Scarto quadratico medio della distribuzione delle intensità	mm/h
$CV(J)$	Coefficiente di variazione	
$m_3(J)$	Momento del secondo ordine della distribuzione delle intensità	$(\text{mm/h})^3$
$f(t_i)$,	Peso di un singolo intervallo temporale in funzione dell'altezza di precipitazione h_i	

h_i	Altezza di precipitazione di un singolo intervallo temporale	mm
h_{tot}	Altezza di precipitazione totale di un evento	mm
$m(t)$	momento del primo ordine del tempo in funzione dell'altezza di precipitazione	h
$s(t)$	Scarto quadratico medio del tempo rispetto a $m(t)$ in funzione dell'altezza di precipitazione	h
$m_3(t)$	Momento del terzo ordine del tempo rispetto a $m(t)$ in funzione dell'altezza di precipitazione	h^3
J_{norm}	Intensità di precipitazione normalizzata	
t_{norm}	Tempo normalizzato alla durata di un singolo evento	
t_0	Tempo di inizio dell'evento	h
t_f	Tempo di fine dell'evento	h

Capitolo 1

Introduzione

Fra le dinamiche che interessano l'interazione fra uomo e ambiente le colate di detrito rappresentano un fenomeno di primario interesse in quanto, in caso di eventi eccezionali, possono andare ad interferire con le attività antropiche causando danni a persone e opere. Lo studio di questi fenomeni risulta, pertanto, particolarmente importante al fine di valutare il rischio che essi comportano ed eventualmente di mitigarlo intervenendo in maniera opportuna.

L'area di Cortina d'Ampezzo, in cui si è svolto lo studio che ha portato alla stesura di questa tesi, si trova in un contesto dolomitico, caratterizzato da una morfologia complessa, definita da ampie vallate delimitate da imponenti pareti rocciose sotto le quali, nel corso dei millenni si sono accumulati dei grandi depositi di falda. Questi depositi sono spesso soggetti a colate di detrito che, tipicamente, vengono innescate da eventi di precipitazione con particolari caratteristiche.

Data la grande variabilità degli elementi che danno origine a questo tipo di fenomeni, è importante selezionare le aree più a rischio ed effettuare degli studi di dettaglio, definendo nello specifico i parametri che possono scatenare le colate in un determinato sito.

Il sito da colate di detrito del Rio Acquabona, nel Comune di Cortina d'Ampezzo, è oggetto di monitoraggio da parte dell'università di Padova dal 1997. Questo elaborato si inserisce quindi all'interno di un percorso di ricerca più ampio che si occupa di creare un sistema di monitoraggio efficiente, definire il comportamento delle colate di detrito che si verificano nel sito e il tipo di eventi che vanno a innescarle.

In particolare, all'interno di questa tesi, si è deciso di analizzare nel dettaglio le precipitazioni che si sono verificate all'interno dell'area di studio, sia

considerandole nella loro totalità che studiando i singoli eventi, e di descrivere come queste hanno influito sull'innescò dei fenomeni di colata o di scorrimento superficiale che si sono verificati nel sito del Rio Acquabona e nel canale ad esso adiacente durante il periodo compreso fra il 4 aprile 2016 ed il 12 ottobre 2016.

Capitolo 2

Il sito di monitoraggio

2.1 Inquadramento geografico

Il sito del Rio Acquabona è situato nel Veneto settentrionale all'interno del Comune di Cortina d'Ampezzo in provincia di Belluno. L'area si trova nel cuore delle Dolomiti Bellunesi, sul versante sud-occidentale del massiccio del Sorapis in sinistra orografica della Valle del Boite fra i centri abitati di Cortina d'Ampezzo e San Vito di Cadore, da cui dista in entrambi i casi circa 5 km.

Il sito di studio (*Figura 2.1*) si sviluppa fra una quota di 1128 m s.l.m., in corrispondenza del bacino di ritenzione dei sedimenti posto in prossimità della Strada Statale 51 Alemagna in località Acquabona, e una quota di 1750 m s.l.m. circa, in concomitanza della parte più alta della zona di alimentazione. Il bacino di ritenzione ha coordinate $46^{\circ}30'15''\text{N}$, $12^{\circ}09'48''\text{E}$, mentre la zona di alimentazione ha coordinate $46^{\circ}30'15''\text{N}$, $12^{\circ}10'44''\text{E}$. La distanza lungo alveo fra le due zone è di circa 1600 m.

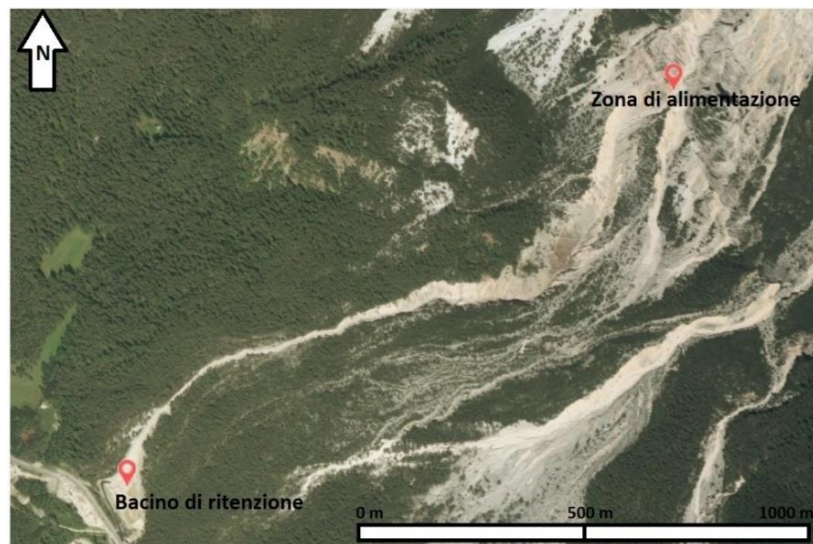


Figura 2.1: L'area di studio del rio Acquabona. Sono indicate le posizioni della bacino di ritenzione e della zona di alimentazione (immagine LANDSAT).

2.2 Inquadramento geologico

Il sito del Rio Acquabona si colloca nel contesto delle Dolomiti Bellunesi. All'interno dell'area di studio (Figura 2.2) sono comprese due formazioni rocciose, ovvero la Formazione di Travenanzes e la formazione della Dolomia Principale, oltre ai depositi di versante [1].

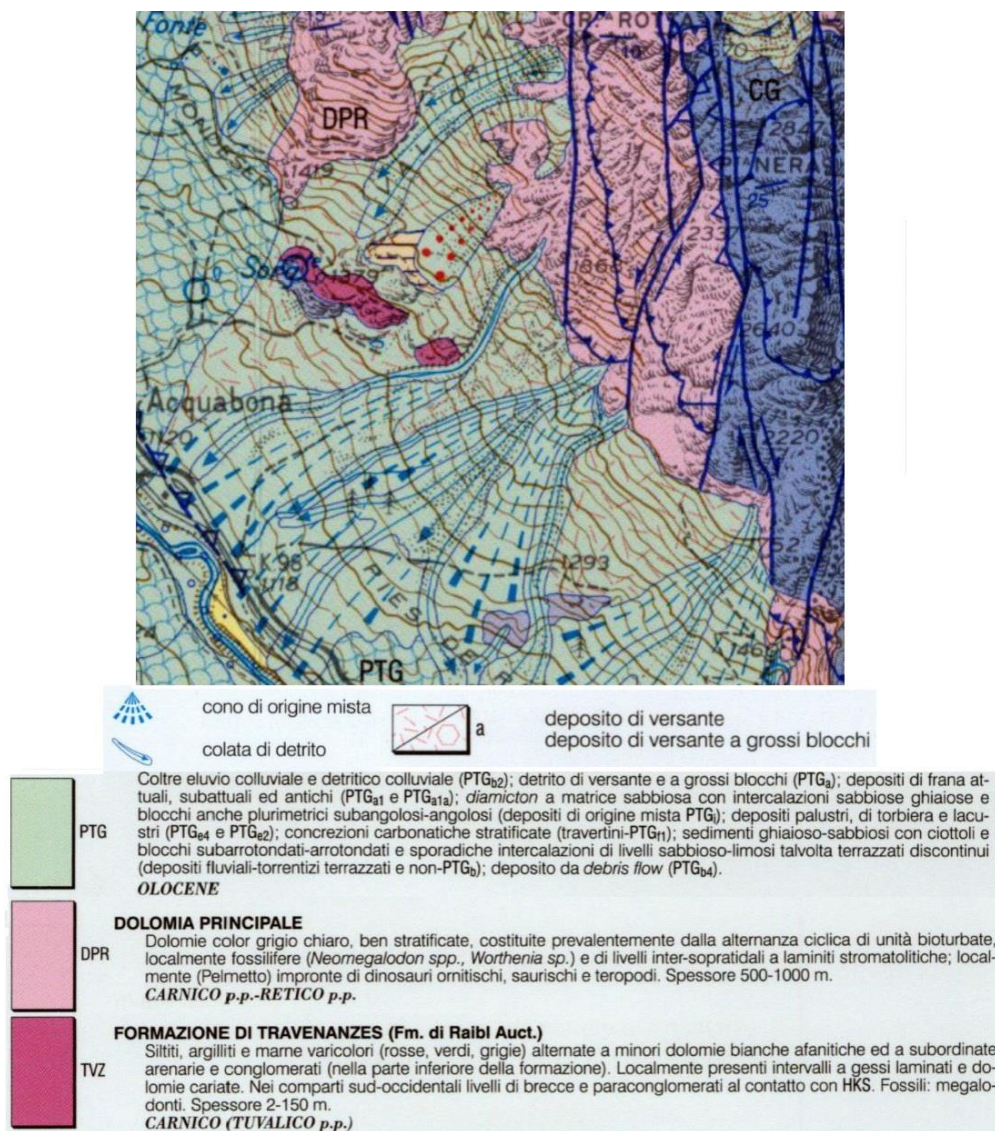


Figura 2.2: Dettaglio del sito del Rio Acquabona tratto dalla Carta Geologica d'Italia 1:50000, Foglio 29, Cortina d'Ampezzo. In basso sono riportati gli elementi della legenda attinenti all'area di studio (fonte: sito ISPRA).

Formazione di Travenanzes

La Formazione di Travenanzes, chiamata precedentemente Formazione di Raibl, è composta da siltiti, argilliti e marne varicolori alternate a minori dolomie bianche afanitiche e a subordinate arenarie e conglomerati (nella parte inferiore della formazione). Localmente possono essere presenti intervalli a gessi laminati e dolomie cariate. Nei comparti sud-occidentali presenta livelli di breccie e paraconglomerati al contatto con la Formazione di Heiligkreuz. Lo spessore varia dai 2 m ai 150 m. Le rocce componenti tale formazione si sono depositate durante l'età del Carnico: hanno dunque un'età che può variare fra circa 228,7 e $216,5 \pm 2,0$ milioni di anni [1].

Nell'area di studio la Formazione di Travenanzes affiora all'interno del canale del Rio Acquabona poco al di sotto della sua parte sommitale ed è ben riconoscibile anche da lontano per la sua alternanza di strati rossastri e strati più chiari (vedi *Figura 2.3*).



Figura 2.3: Affioramento della Formazione di Travenanzes all'interno del canale del Rio Acquabona.

Formazione della dolomia principale

La formazione della Dolomia Principale è composta da dolomie color grigio chiaro ben stratificate costituite prevalentemente dall'alternanza ciclica di unità bioturbate,

localmente fossilifere (*Neomegalodon* spp., *Worthenia* sp.) e livelli inter-sopratidali a laminiti stromatolitiche. Lo spessore varia da 500 m a 1000 m [1].

Nel sito di studio la Formazione della Dolomia Principale dà origine alle imponenti pareti del massiccio del Sorapis (*figura 2.4*) che sovrastano il canale.

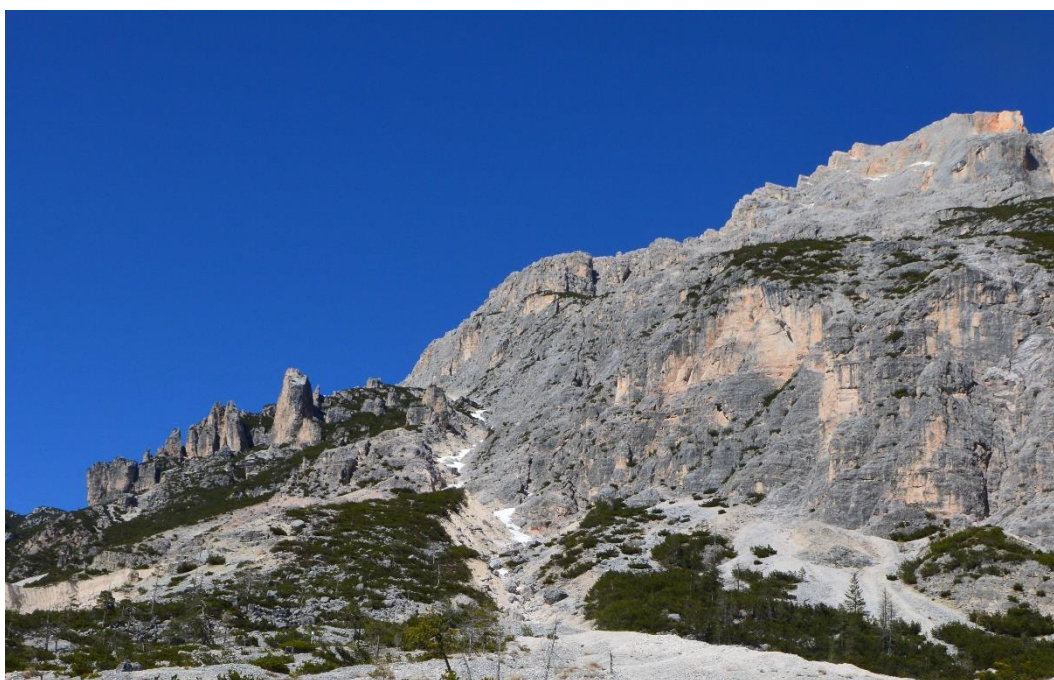


Figura 2.4: Le imponenti pareti formate dalla Formazione della Dolomia Principale che sovrastano il Rio Acquabona.

Depositi di versante

I depositi di versante che si trovano nell'area del Rio Acquabona sono per lo più composti da materiale granulare con dimensioni che variano dai blocchi di grosse dimensioni a limi e argille. Questo materiale si deposita in conoidi e falde detritiche alla base delle pareti rocciose a seguito di fenomeni di disgregazione delle litologie presenti a monte e può essere poi movimentato fino all'alveo del Fiume Boite [2]. Su tutto il versante comprendente l'area di studio si possono osservare ampi depositi da debris-flow depositatisi in momenti diversi.

2.3 Inquadramento geomorfologico

Il sito presenta un bacino di drenaggio in roccia, posto al di sopra dei depositi di versante che costituiscono il conoide di deiezione su cui si imposta il canale di scorrimento, che si estende su una superficie limitata, con un dislivello tra la quota massima e minima di circa 1000 m e una pendenza media molto alta. Le rocce che costituiscono tale bacino hanno una permeabilità elevata, soprattutto in virtù della loro notevole fratturazione.

Ciò si traduce in un tempo di corrivazione alla sezione di chiusura molto ridotto e fa sì che durante eventi di pioggia ad alta intensità si fornisca in un breve periodo un abbondante apporto di acqua agli accumuli di detrito sottostanti. Ne consegue che, specialmente su depositi già parzialmente saturati e disposti su pendenze elevate, possa verificarsi una mobilitazione di grandi volumi di materiale sciolto [2].

Sotto il bacino in roccia è presente il canale di colata che ha una lunghezza di circa 1600 m e un dislivello fra la quota minima e massima di circa 500 m con una pendenza elevata. Questo canale, nella parte più a monte (*Figura 2.5*), dove si imposta nel detrito di versante e su depositi di debris-flow, è fortemente inciso e gli argini presentano pendenze elevate. È inoltre da notare l'assenza di depositi sul fondo. I depositi di versante e le rocce della Formazione di Travenanzes incisi dal canale vengono inglobati dal debris-flow in avanzamento per erosione laterale e ruscellamento [2].

Nella parte più bassa del canale di scorrimento gli argini presentano pendenze minori e sono presenti zone di accumulo di detrito e di erosione recenti alternate fra di loro (*Figura 2.6*).

Il canale termina con un bacino di accumulo dei sedimenti costruito all'inizio degli anni '80 per proteggere dalle colate di detriti la Strada Statale 51 Alemagna (*Figura 2.7*). Per impedire alla colata di seguire un percorso non corretto ed eventuali tracimazioni sono stati costruiti degli argini artificiali (*Figura 2.8*) che tuttavia non impediscono del tutto la fuoriuscita del materiale dal letto, soprattutto nei punti in cui il fondo dell'alveo si è alzato e gli argini sono meno elevati [2].



Figura 2.5: Il canale di scorrimento nella parte più a monte. Sulla destra si può notare la Formazione di Travenanzes.



Figura 2.6: Il canale di scorrimento nella parte più a valle.



Figura 2.7: Il bacino di accumulo dei sedimenti posto subito a monte della Strada Statale 51 Alemagna.



Figura 2.8: Gli argini artificiali costruiti nell'ultimo tratto del canale.

Capitolo 3

Il sistema di monitoraggio del Rio Acquabona

L'attività di monitoraggio dell'Università di Padova all'interno del sito da colate di detrito del Rio Acquabona è ormai quasi ventennale. All'interno di questo capitolo verrà riassunta la storia dei sistemi di monitoraggio che si sono succeduti nel corso del tempo, si descriverà il sistema di monitoraggio utilizzato durante l'attività svolta per questa tesi e si parlerà degli sviluppi futuri di quest'ultimo, trattando in particolar modo la stazione intermedia che avrebbe dovuto essere operativa già da quest'anno, ma di cui, per motivi di natura logistico-amministrativa, è stata montata solo la struttura portante.

3.1 Storia del sistema di monitoraggio del Rio Acquabona

Il primo sistema di monitoraggio, 1997

Il primo sistema di monitoraggio risale al 1997 ed è stato progettato dall'Università di Padova in collaborazione con lo USGS – Cascades Volcano Observatory. Questo primo sistema era composto da tre stazioni di misurazione:

- una stazione di monte, situata nell'area di inizio dei fenomeni di colata ad una quota approssimativa di 1565 m s.l.m.. Tale stazione era equipaggiata con un pluviometro a basculante, un geofono per l'attivazione del sistema di monitoraggio durante gli eventi, quattro trasduttori di pressione dell'acqua distribuiti nel livello superficiale del fondo del canale e uno posizionato ad una profondità maggiore, due telecamere e due videoregistratori VHS attivati dal geofono;
- una stazione intermedia, collocata nella zona di scorrimento ad una quota di circa 1310 m s.l.m. munita di tre geofoni posti ad una distanza di circa 100

m uno dall'altro, il primo dei quali dava inizio alla registrazione, e un anemometro;

- una stazione di valle, posizionata alla fine della zona di scorrimento ad una quota di 1175 m s.l.m. circa. Anche questa stazione era equipaggiata con tre geofoni, posizionati ad una distanza di circa 100 m uno dall'altro, il primo dei quali aveva la funzione di attivare la registrazione dei dati. Erano inoltre presenti un sensore ad ultrasuoni per misurare la distanza dalla superficie di fondo, un sistema di misurazione della pressione totale posizionato all'interno del canale con una superficie di 0,2 x 0,3 m e un range di misura da 0 a 300 kPa, un trasduttore di pressione dell'acqua ed una telecamera con registratore VHS.

Ognuna delle stazioni era alimentata da una batteria da 12 V con un pannello solare ed era fornita di un data logger e un sistema di ricetrasmisione radio che permetteva la connessione ad una stazione di raccolta dati situata in località Socol, a circa 1,3 km da Acquabona. La connessione radio rendeva inoltre possibile controllare il funzionamento della strumentazione e modificarne le impostazioni.

I dati dalle stazioni venivano raccolti in maniera continua con una frequenza di 0,0033 Hz (un'acquisizione ogni cinque minuti) e con una frequenza di 5 Hz durante gli eventi.

Il sistema di monitoraggio era progettato tenendo conto della scarsa quantità di dati che potevano essere trasmessi via radio e del consumo di energia elettrica della strumentazione, in particolar modo delle telecamere e del sensore ad ultrasuoni. Per questo la frequenza di acquisizione variava dalle condizioni normali alla modalità come descritto, e gli apparecchi maggiormente energivori venivano attivati solamente durante gli eventi.

Questo sistema di monitoraggio è stato soggetto ad alcune problematiche. L'utilizzo dei geofoni come sensori per l'attivazione della modalità evento si è rivelato efficace alle stazioni di monte e valle, ma non in quella intermedia facendo sì che non venissero registrati alcuni eventi. Il sistema di misura della pressione totale della stazione di valle, invece, è stato trasportato a valle durante un evento [3] [4].

Il secondo sistema di monitoraggio, 2000

Il secondo sistema di monitoraggio è stato sviluppato nei primi anni 2000 in collaborazione con una compagnia locale per la progettazione e la gestione del sistema di controllo. Anche in questo contesto erano presenti tre stazioni.

- La stazione di monte era collocata nella stessa posizione di quella del sistema precedente ed era equipaggiata con un pluviometro, un geofono per l'attivazione del sistema di monitoraggio durante gli eventi, quattro trasduttori di pressione di superficie e una telecamera con registratore VHS che si sarebbe attivata durante gli eventi.
- Una seconda stazione era collocata nella zona della stazione di valle del sistema precedente. Questa stazione era dotata di quattro geofoni, un sensore a ultrasuoni, un sistema di misurazione del carico totale sul fondo del canale (ancorato ad una solida struttura incassata nel fondo del canale), un piezometro e una videocamera con registratore.
- La terza stazione trovava posto ad una quota di circa 1120 m s.l.m., all'interno del bacino di ritenzione progettato per contenere il materiale mobilitato dalle colate di detrito. Questa stazione era dotata di un misuratore di distanza a ultrasuoni, un sistema di misurazione del carico totale e una videocamera con registratore VHS.

Come in precedenza, le stazioni erano equipaggiate con un sistema di alimentazione locale, un sistema di raccolta dati locale e un sistema di ricetrasmisione radio connesso con la stazione di Socol, dove un modem radio permetteva un trasferimento remoto di dati [3].

Il terzo sistema di monitoraggio, 2009

Il terzo sistema di monitoraggio è stato sviluppato dall'Università di Padova in seguito ai danneggiamenti subiti dal sistema precedente durante un evento particolarmente gravoso avvenuto a luglio del 2009.

La struttura di questo sistema, in parte tuttora in uso, era più semplice di quella dei sistemi precedenti, pur garantendo la possibilità di eventuali ampliamenti. La strumentazione che aveva dato prova di essere poco affidabile o difficilmente

gestibile in questo contesto è stata abbandonata. Altri cambiamenti sono stati introdotti nella alimentazione e nella trasmissione dei dati al fine di aumentare la velocità di trasmissione e di permettere il monitoraggio in tempo reale da remoto.

Sono state costruite due stazioni di monitoraggio:

- una stazione di monte, situata al di sopra della zona di accumulo dei sedimenti che alimentano le colate di detrito, ad una quota di circa 1715 m s.l.m., in un'area non coinvolta dai fenomeni di erosione che rischiavano di interessare la posizione della stazione precedente. In questa stazione era collocata una stazione meteorologica Vaisala in grado di acquisire dati riguardanti le precipitazioni liquide, velocità e direzione del vento, pressione barometrica e umidità relativa. L'energia era fornita da tre pannelli solari da 20 W ciascuno che caricavano una batteria da 12 V/24 Ah tramite un regolatore di potenza da 3 A. I dati ottenuti erano raccolti da un microcontroller Rabbit RCM4000 li indirizzava ad un trasmettitore radio con una potenza di 0,1 W ed una frequenza portante di 2,4 GHz. Tutta la strumentazione era supportata da pali di acciaio zincato.

A causa della scarsa accessibilità del sito, l'installazione è avvenuta tramite l'uso di un elicottero per trasportare il materiale. Per rendere l'accesso alla stazione sicuro è stato realizzato un breve percorso attrezzato con un cavo di acciaio.

- Una stazione di valle, collocata su un grosso masso sul margine sinistro del canale ad una quota di circa 1185 m s.l.m.. La strumentazione era montata su di una struttura a traliccio (tuttora in uso) ancorata ad un grosso masso. La lunghezza del braccio della struttura era di circa sei metri ed era in grado di raggiungere il centro della sezione del canale. La strumentazione montata sul braccio si trovava ad una distanza dal fondo del canale di circa 3,5 m e per permetterne il montaggio, la manutenzione e lo smontaggio, la struttura di supporto poteva ruotare di circa novanta gradi per allinearsi al bordo sinistro. Gli strumenti che trovavano posto su questa struttura erano un pluviometro a basculante, un misuratore di distanza ad ultrasuoni, una

videocamera digitale con un sistema di illuminazione notturna ed un ricevitore radio compatibile con il trasmettitore della stazione di monte.

A monte della stazione, lungo il margine sinistro, erano stati posizionati tre geofoni ad una distanza di circa 100 m uno dall'altro, mentre un centinaio di metri a valle era presente un quarto geofono.

I dati misurati venivano raccolti da un singolo computer e archiviati localmente. Il processore e l'unità di memoria locale potevano essere controllati da remoto tramite un accesso a internet. [3]

3.2 Il sistema di monitoraggio utilizzato nel 2016

Il sistema di monitoraggio utilizzato nel 2016 per la raccolta dei dati discussi in questa tesi è stato ulteriormente semplificato in modo da raggiungere una configurazione che fosse il più possibile affidabile.



Figura 3.1: Le posizioni degli elementi del sistema di monitoraggio all'interno del sito del Rio Acquabona. SV indica la stazione di valle, PV il pluviometro di valle, PI il pluviometro intermedio e PM il pluviometro di monte (immagine LANDSAT).

Il sistema di monitoraggio attuale è composto dagli elementi che verranno di seguito trattati e le cui posizioni sono visibili in *Figura 3.1*.

- Pluviometro di monte, situato ad una quota di 1715 m s.l.m. circa, sullo sperone roccioso che in precedenza ospitava la stazione di monte. Dal 2015, a seguito di intense nevicate invernali che hanno danneggiato i pali di sostegno e i pannelli solari, la stazione meteorologica Vaisala precedentemente utilizzata è stata sostituita con un più semplice pluviometro a basculante alimentato da un pannello solare.
- Pluviometro intermedio, posizionato in sinistra orografica, piuttosto spostato rispetto al canale in modo da evitare che sia interessato dai fenomeni di erosione della scarpata, all'altezza della Formazione di Travenanzes. Tale pluviometro, posizionato in questa posizione anche nel 2015, viene posto ad un'altezza di circa 2 m su di un palo di acciaio zincato.
- Pluviometro di valle, anch'esso in uso dal 2015, è collocato in sinistra orografica del canale circa duecento metri a monte rispetto alla stazione di valle, in prossimità della nuova stazione intermedia che sarà operativa dal prossimo anno.
- Stazione di valle: si tratta della stazione in uso dal 2009 precedentemente descritta, ma con delle modifiche nella strumentazione utilizzata. La stazione si trova sul margine sinistro del canale (vedi *Figura 3.2*) nella parte finale della zona di scorrimento, ad una quota di 1185 m s.l.m..



Figura 3.2: Posizione della stazione di valle rispetto al canale.

La stazione (vedi *Figura 3.3*) è composta da un basamento in calcestruzzo, costruito a ridosso di un grosso masso, in cui è infisso un perno cilindrico su cui ruota la struttura metallica soprastante. Tale struttura è composta da un braccio metallico della lunghezza di sei metri, composto da tre elementi a traliccio, lunghi due metri ciascuno, in acciaio zincato che vengono imbullonati fra loro. Ognuno di questi elementi è collegato ad una colonna centrale, anch'essa costituita da una struttura a traliccio in acciaio zincato, tramite un tirante in acciaio che garantisce maggior stabilità. Per controbilanciare il momento flettente indotto da questo braccio, alla parte opposta della colonna centrale è collegato un cassone, anch'esso sorretto da un tirante metallico, che viene riempito di pietre prese in loco e funge da contrappeso. All'estremità del braccio vengono fissati la strumentazione di misura (in questo caso composta dalla telecamera con il sistema di illuminazione) e due pannelli in polistirene che fungono da protezione. Il resto della strumentazione è ospitata da due armadi posti in prossimità della struttura girevole e protetti da un ombreggiatore composto da pannelli in polistirene che ha lo scopo di evitare il surriscaldamento dell'attrezzatura all'interno (le temperature misurate all'interno degli armadi prima della costruzione dell'ombreggiatore arrivavano a superare i 55°C) [4].

La corrente elettrica arriva alla stazione per mezzo di un cavo sospeso assicurato a degli alberi nel primo tratto e fatto poi passare sotto terra in corrispondenza della stazione fino al primo armadio, dove è contenuto il gruppo di continuità. La corrente ed il contatore associato, collocato a valle della Statale 51 Alemagna in località Acquabona, sono stati forniti dal Comune di Cortina d'Ampezzo.

Di seguito verrà descritta nel dettaglio la strumentazione utilizzata per il monitoraggio del canale di colata del Rio Acquabona durante lo svolgimento di questa tesi.



Figura 3.3: La stazione di valle con gli elementi che la compongono. 1: armadio contenente la strumentazione di controllo; 2:ombreggiatore; 3:Cesta di contrappeso; 4:braccio metallico; 5:telecamera.

I pluviometri

I tre pluviometri a basculante (vedi *Figura 3.4*) utilizzati nel 2016 sono il modello M1-PLUV500 della ditta Tecnopenta s.r.l. di Teolo, PD. La superficie di raccolta è di 500 cm² e la risoluzione di 0.2 mm di pioggia. Lo strumento fornisce, in occasione di ogni basculata, giorno, mese, anno, ora, minuto e secondo, il valore cumulato della precipitazione e la tensione di alimentazione in volt. Tutti e tre i pluviometri sono alimentati da un pannello solare da 20 W che va a ricaricare una batteria.

Gli strumenti sono fissati all'estremità di un palo in acciaio zincato ad un'altezza di due metri dal suolo. Nel caso del pluviometro di monte il palo è infisso direttamente nella roccia, mentre nei pluviometri intermedio e di valle si è proceduto, già nel 2015, a praticare un foro, di diametro maggiore a quello del palo, rivestito da un tubo in PVC in cui inserire il palo di sostegno riempiendo lo spazio restante con ghiaia trovata sul posto in modo da garantire possibilità di drenaggio e stabilità al tutto.



Figura 3.4: A sinistra il pluviometro intermedio con il suo pannello solare in posizione sul palo di sostegno in acciaio zincato; a destra lo stesso pluviometro aperto.

.

La telecamera

La telecamera utilizzata è la stessa presente nel sistema del 2009. Si tratta del modello Videoline Ep-CC480M4, CCD 1/3" Sony Super HAD, 480TVL. Supporta due modalità di compressione delle immagini: MJPEG e MPEG4. La velocità di scatto può variare fra 1/50 e 1/100.000 e il tasso di acquisizione delle immagini può arrivare fino a 25 frames/secondo. La temperatura a cui può operare è compresa fra 5°C e 50°C, mentre l'umidità relativa dovrebbe rimanere fra 20% RH e 80% RH. L'illuminazione minima a cui opera è di 0,5 lux, sempre garantiti dal sistema di illuminazione. Il peso è di circa 300 g ed è protetta da un involucro impermeabile (vedi *Figura 3.5*).

Il sistema di illuminazione

L'illuminazione è fornita da un faro led da 40 W. Visto il consumo ridotto di questo tipo di faro, si è deciso di lasciarlo acceso sempre, in modo da evitare le complicanze derivanti da un sistema di accensione e spegnimento automatici.



Figura 3.5: Il sistema di illuminazione e la telecamera in posizione all'interno del suo involucro.

Il PC Helios

Il sistema di monitoraggio è controllato da un computer industriale Helios modello HLV800-256AV della Diamond System Corporation (vedi *Figura 3.6*). La scheda monta il sistema operativo Slackware Linux.

Il disco rigido

Il disco rigido su cui vengono immagazzinati i dati raccolti dalla stazione è il modello My Book World Edition prodotto dalla Western Digital. Questo disco ha una capacità di 1 TB ed è possibile accedervi via internet tramite Core FTP.

Il router

La connessione della stazione alla rete 3G avviene tramite un router modello MoRoS HSPA 2.1 PRO prodotto da INSYS MICROELECTRONICS GmbH collegato ad un'antenna posta all'esterno dell'armadio. La scheda SIM per la connessione internet è stata fornita dal Comune di Cortina d'Ampezzo.

L'unità di continuità UPS

L'unità di continuità utilizzata è il modello SENTINEL PRO prodotto dalla ditta Riello. Tale unità riceve la corrente direttamente dalla linea elettrica a 230 V in

corrente alternata e li trasforma in una corrente continua a 12 V con cui viene alimentata tutta la strumentazione che costituisce la stazione garantendo un'alimentazione costante. È inoltre dotato di una batteria che, in caso di interruzione temporanea della fornitura elettrica, garantisce il funzionamento della strumentazione per qualche ora. Nel caso l'interruzione di corrente fosse prolungata e la batteria si scaricasse, una volta ripresa l'alimentazione, l'unità si riavvia automaticamente e dovrebbe garantire la ripresa del funzionamento di tutta la stazione (vedi *Figura 3.6*).

Gli alimentatori

Gli alimentatori collegati all'unità di continuità che forniscono energia alla strumentazione all'interno degli armadi meritano una menzione in quanto sono sovradimensionati rispetto all'energia che devono trasmettere. Ciò è necessario al fine di evitare un eccessivo surriscaldamento all'interno degli armadi che potrebbe andare ad inficiare il buon funzionamento di tutta la strumentazione.

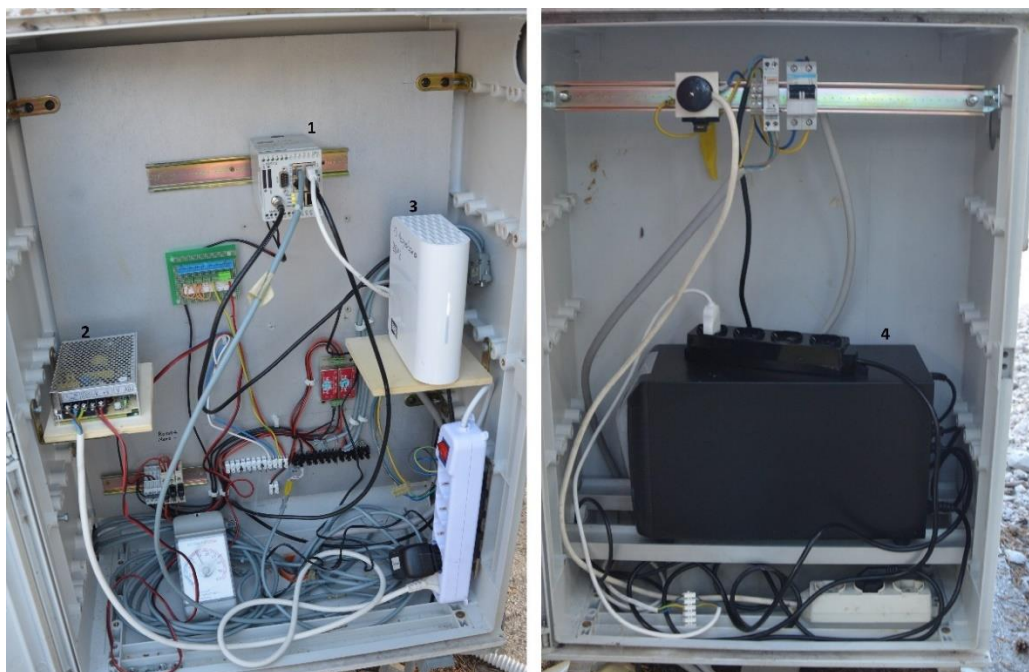


Figura 3.6: La strumentazione contenuta all'interno dell'armadio della stazione di valle. 1: router; 2: computer Helios; 3: disco rigido; 4: unità di continuità.

3.3 Sviluppi futuri: la nuova stazione intermedia

In questo paragrafo viene descritta la nuova stazione intermedia che avrebbe dovuto essere operativa già da quest'anno, ma che a causa di problemi logistico-amministrativi ha visto completata solo la struttura portante.

La collocazione scelta per la nuova stazione è circa duecento metri a monte rispetto alla stazione di valle in prossimità del pluviometro di valle (vedi *Figura 3.7*). Tale posizione risulta strategica, in quanto rappresenta il passaggio fra la zona di scorrimento più incisa, che si trova a monte e da cui è molto improbabile che un'eventuale colata possa fuoriuscire, e la zona di scorrimento inferiore, in cui gli argini poco sviluppati fanno sì che un'eventuale colata possa fuoriuscire dal canale cambiando percorso. Pertanto, il luogo in cui si è deciso di porre la stazione rappresenta il punto più a valle in cui si ha una relativa certezza che una colata sviluppatasi nel sito del Rio Acquabona transiti.



Figura 3.7: La posizione della stazione intermedia.

La struttura è già stata completata e consiste in un basamento in cemento, ancorato ad un grosso masso in sinistra orografica del canale, su cui viene fissato, tramite un perno che ne permette la rotazione, un braccio metallico (vedi *Figura 3.8*). Tale

braccio, della lunghezza complessiva di sei metri, è composto da tre tralicci in acciaio zincato della lunghezza di due metri l'uno. Ognuno di questi tralicci è collegato ad un pilone centrale da due tiranti in acciaio. Il momento flettente creato dal braccio sul basamento è contrastato da un cassone in acciaio, riempito con pietre reperite in loco, imbullonato ad un elemento a traliccio di due metri opposto al braccio e fissato al pilone centrale da un tirante.

Il braccio viene fissato, tramite una spina passante nel perno di rotazione, perpendicolarmente al bordo del canale, in modo che l'estremità si trovi al centro della sezione di quest'ultimo ad un'altezza di circa cinque metri dal fondo.

A ridosso del masso su cui è posta la struttura metallica è stato collocato un armadio che andrà ad ospitare la strumentazione di controllo (vedi *Figura 3.8*).



Figura 3.8: La struttura e l'armadio della stazione intermedia.

La stazione verrà alimentata da una linea di corrente, a cura del Comune di Cortina d'Ampezzo, e passerà su di un cavo aereo assicurato a pali in legno e alberi. Tale linea avrebbe potuto essere installata già da quest'anno permettendo di iniziare il monitoraggio anche con questa stazione, ma, a causa di problematiche di natura logistico-amministrativa, il lavoro è stato rimandato al 2017.

La strumentazione della stazione è la seguente. Verranno montate al braccio rotante tre telecamere, fornite di sensori di movimento, che saranno utilizzate per effettuare

della fotogrammetria 3D dei fenomeni di colata che avvengono nel canale. Una delle tre telecamere potrebbe essere orientata in modo da riprendere i fenomeni che avvengono nella zona di innesco, ma ciò è ancora in fase di valutazione. Al braccio sarà assicurato anche un distanziometro laser per misurare eventuali variazioni nell'altezza del fondo del canale. All'interno dell'armadio troverà posto la strumentazione di controllo, costituita da un'unità di continuità UPS, un computer Athena, un disco rigido e un router.

Una possibile evoluzione della stazione ai fini della protezione civile potrebbe essere rappresentata dall'installazione di uno o più geofoni posizionati lungo il margine del canale ed un inclinometro posto all'interno di quest'ultimo. Questa strumentazione, associata all'uso delle telecamere (munite di sensori di movimento) potrebbe servire a dare l'allarme nel caso di passaggio di una colata. L'uso di più strumenti (telecamere, geofoni e inclinometro) serve per fornire la ridondanza necessaria ad affermare che un evento sta effettivamente avvenendo.

Di seguito viene descritta nel dettaglio la strumentazione, che sarebbe stata potenzialmente operativa già da quest'anno, che andrà ad equipaggiare la stazione intermedia.

Le telecamere

Le telecamere che verranno installate sono il modello DS-2CD6026FHWD-(A) prodotto dalla ditta HIKVISION. La velocità di scatto può variare fra 1 s e 1/100.000 s e il tasso di acquisizione delle immagini può arrivare fino a 60 frames/secondo e vi è la possibilità di acquisire immagini anche in condizioni di scarsa luce. Tali telecamere sono in grado di individuare un cambiamento di scenario nell'inquadratura e di inviare un sms ad un numero predefinito. Le telecamere saranno poste all'interno di una custodia impermeabile dotata di un riscaldatore da 220 V (vedi *Figura 3.9*).

Il sistema di illuminazione

Nonostante le telecamere siano in grado di acquisire immagini in condizioni di scarsa luce, è previsto l'uso di un proiettore a LED integrato da 50 W e 3500 lumen (vedi *Figura 3.10*).

Il PC Athena

La strumentazione verrà gestita da un computer industriale modello Athena prodotto dalla Diamond System.

Il router

Come per la stazione di valle, la connessione della stazione alla rete 3G avverrà tramite un router modello MoRoS HSPA 2.1 PRO prodotto da INSYS MICROELECTRONICS GmbH e collegato ad un'antenna 2G/3G fissa.

L'unità di continuità UPS

L'unità di continuità utilizzata, prodotta dalla ditta Atlantis, sarà un UPS da nominali 600 W con batterie da 168VAh a cui verranno aggiunte due batterie statiche aggiuntive tipo AGM per climi rigidi da 288 VAh (vedi *Figura 3.11*).



Figura 3.9: La telecamera e il suo involucro che andranno ad equipaggiare la nuova stazione intermedia.



Figura 3.10: Il proiettore LED che verrà installato nella nuova stazione intermedia.



Figura 3.11: L'unità di continuità della nuova stazione intermedia con le due batterie aggiuntive.

Capitolo 4

Attività di monitoraggio svolta nel 2016

In questo capitolo sono riportate le attività svolte al fine di monitorare il sito del Rio Acquabona e gli eventi ivi avvenuti nell'arco temporale compreso fra aprile e ottobre 2016. In questo periodo sono state svolte diverse uscite sul campo allo scopo di installare gli strumenti di misurazione, verificarne il funzionamento, scaricare i dati, controllare le condizioni del canale di colata e osservare gli effetti degli eventi avvenuti.

7 aprile 2016

Il 7 aprile 2016 sono stati ritirati, presso la ditta Tecnopenta di Teolo (PD), i tre pluviometri a basculante con i relativi pannelli fotovoltaici da installare nell'area di studio.

Nei giorni successivi i pluviometri sono stati montati all'aperto posti uno vicino all'altro in modo da verificarne il funzionamento. A seguito di un evento di precipitazione misurato da questi ultimi si è riscontrata una discordanza fra i dati misurati dai tre strumenti. I pluviometri sono quindi stati riportati alla casa costruttrice dove il problema è stato risolto.

20 aprile 2016

Il 20 aprile 2016 è stata effettuata un'uscita finalizzata all'installazione dei pluviometri (vedi *Figura 4.1*) nelle tre stazioni poste a diversa quota in sinistra orografica del canale di colata del Rio Acquabona nel Comune di Cortina d'Ampezzo.

I pluviometri con i relativi pannelli fotovoltaici per l'alimentazione e, nel caso dei pluviometri intermedio e di valle, con i tubi in acciaio di sostegno sono stati trasportati in loco a spalla e installati. I pluviometri sono stati posizionati negli stessi punti in cui erano stati collocati l'anno precedente: quello di valle in prossimità del sito in cui in agosto è stata poi montata la stazione di monitoraggio intermedia,

quello intermedio alla quota della formazione di Travenanzes e quello più in quota sullo sperone roccioso che ospita la stazione di monte. Tutti gli strumenti sono stati posizionati a livello con l'ausilio di una livella a bolla, ad un'altezza di circa due metri dal suolo e ne è stato verificato il corretto funzionamento effettuando una o più basculate di test.



Figura 4.1: I tre pluviometri. Da sinistra: pluviometro di valle, pluviometro intermedio e pluviometro di monte.

18 maggio 2016

In tale data, presso il Laboratorio di Idrogeologia del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, si è proceduto ad un montaggio indoor della strumentazione componente la stazione di monitoraggio di valle al fine di verificarne il corretto funzionamento. In tal modo si sono potute individuare le criticità maggiori di cui tenere conto al momento del montaggio sul sito di studio. Il sistema di monitoraggio, composto da unità UPS, router, disco rigido e telecamera è stato lasciato, per tutto il fine settimana seguente, montato e funzionante in laboratorio in modo da poterne verificare il funzionamento collegandosi da remoto tramite internet. La telecamera è stata settata con una velocità di acquisizione di

0,625 frames/secondo. In questo periodo il sistema di monitoraggio ha dato prova di funzionare a dovere. Unico elemento rilevato di cui tenere conto è stato il fatto che trasferendo i files dal disco rigido a computer tramite internet veniva attribuito un tempo diverso da quello di ripresa.

20 maggio 2016

Il 20 maggio 2016, poco dopo le ore 11.30 si è verificato il crollo di una grossa porzione di roccia dalla Punta Nera, un'antecima del Sorapis posta proprio sopra la frazione di Acquabona. Il materiale distaccatosi è andato a schiantarsi con grande fragore nel canale in sinistra orografica a quello in studio, in cui nell'estate del 2015 avevano avuto luogo le colate detritiche che hanno interessato la Statale 51 Alemagna, fermandosi a monte della strada (Fonte: Corriere delle Alpi).

27 maggio 2016

Il 27 maggio 2016 è stata effettuata un'uscita con lo scopo di montare la stazione di valle, verificare il funzionamento dei pluviometri e scaricare i dati raccolti da questi ultimi.

All'arrivo è stata osservata una modifica della derivazione elettrica di alimentazione della stazione, effettuata dal Comune di Cortina d'Ampezzo all'interno della discarica delle Regole d'Ampezzo collocata subito a valle della strada statale e della vasca di accumulo del canale di colata. La nuova derivazione ha una potenza di 5 kW e serve la stazione di monitoraggio del rio Acquabona e la costruenda stazione di monitoraggio della colata dalla Punta Nera a cura dell'Anas. L'intervento dei tecnici del Comune ha permesso di attivare l'alimentazione alla stazione di monitoraggio.

Si è dunque provveduto al montaggio della struttura della stazione di valle, composta da un sostegno girevole a cui è collegato un braccio metallico su cui sono stati fissati una telecamera e un faro led da 40 W, riparati da due pannelli di polistirene messi a spiovente. Un cassone metallico riempito con grosse pietre prese in loco funge da contrappeso. Nell'armadio a fianco del braccio (vedi *Figura 4.2*) sono stati posizionati l'unità UPS, che riceve l'energia dalla rete a 230 V in corrente

alternata e li restituisce a 12 V in corrente continua, il disco fisso dove vengono raccolti i dati e il router che permette l'accesso alla stazione tramite internet. A causa del livello di depositi decisamente più alto di quando la stazione è stata progettata, si è deciso di posizionare il braccio parallelamente al canale (vedi *Figura 4.3*), in modo da ridurre possibili danneggiamenti in caso di un eventuale evento di colata. In tal modo la telecamera inquadrava la sezione trasversale completa del canale. Il montaggio della stazione ha richiesto più tempo del previsto, soprattutto a causa della difficoltà nel realizzare i collegamenti elettrici della telecamera.

Finito di montare la telecamera si è provveduto a raggiungere i tre pluviometri per verificarne il corretto funzionamento, assicurarsi che non fossero ostruiti dalla polvere sollevata durante il crollo del 20 maggio 2016 e scaricare i dati raccolti dall'installazione. Tutti e tre gli strumenti sono stati trovati funzionanti, liberi da polvere ed efficienti ed i dati sono stati scaricati con successo.

Nel corso dell'uscita è stato possibile osservare un nuovo accumulo di materiale depositato nel canale adiacente a quello in studio a seguito dell'evento di crollo del 20 maggio. Per tutta la giornata si è sentito il rumore di scariche di materiale che ancora franava a valle nella parte alta del canale e in un paio di occasioni è stato possibile vedere dei nuvoloni di polvere sollevati da questi fenomeni di franamento.



Figura 4.2: Strumentazione della stazione di valle. Da sinistra: l'UPS, l'armadio con il disco rigido, il modem e i collegamenti, la telecamera e il faro.



Figura 4.3: La stazione di valle montata e in posizione.

29 maggio 2016

Il 29 maggio, dopo soli due giorni dall'installazione, non è più stato possibile accedere alla telecamera tramite la connessione internet.

15 giugno 2016

Attorno alle 4 del mattino del 15 giugno 2016, una colata di detrito con un fronte di oltre 80 metri e uno spessore di 2 metri proveniente dal canale adiacente a quello in studio ha invaso la Statale 51 Alemagna (*Figura 4.4*) bloccando il traffico fino alle 16 (Fonte: Il Gazzettino).



Figura 4.4: La colata di detriti del 15 giugno 2016 (foto Vigili del Fuoco).

20 giugno 2016

In tale data è stata fatta un'uscita allo scopo di verificare a cosa fosse dovuta l'interruzione della trasmissione da parte della telecamera e, se possibile, risolvere il problema.

È stato subito notato che l'UPS era completamente carico, ma spento. Si è quindi dedotto che, a seguito di un'interruzione temporanea della corrente, l'UPS non si è riavviato come avrebbe dovuto fare. Una volta riaccesso quest'ultimo la stazione ha ripreso a funzionare. Connettendosi alla stazione tramite cavo con un computer portatile è stato osservato che tutte le componenti della stazione risultavano funzionanti salvo la telecamera. Da alcuni test fatti con un voltmetro si è capito che il problema consisteva in un problema di alimentazione dovuto a un collegamento elettrico non funzionante. Rifatto questo collegamento la telecamera ha ripreso a funzionare. Nel frattempo si è deciso di scollegare l'UPS dalla linea elettrica in modo da farlo scaricare e verificarne poi il comportamento in fase di riaccensione. Aspettando che l'UPS si scaricasse è stato raggiunto il pluviometro di valle e sono stati scaricati i dati misurati dall'ultima uscita. Lo strumento è stato trovato efficiente e funzionante e non è stato trovato materiale al suo interno.

Nuovamente alla stazione di valle, dopo che l'UPS ha smesso di funzionare perché completamente scarico, si è deciso di riallacciarlo alla rete elettrica. Una volta ripresa l'alimentazione, il sistema si è riattivato correttamente.

13 luglio 2016

Nelle ultime ore di tale data, a seguito di un evento di precipitazione, si è verificato un fenomeno di scorrimento superficiale all'interno del canale che è andato ad erodere il fondo e a creare un solco nel lato in destra orografica.

19 luglio 2016

Il 19 luglio è stato effettuato un sopralluogo al sito della stazione intermedia assieme al titolare della ditta che si è poi occupata del montaggio della struttura di supporto di quest'ultima.

Sono inoltre stati raggiunti tutti e tre i pluviometri, sono stati scaricati i dati da essi

raccolti e ne è stato verificato il corretto funzionamento e l'assenza di polvere o detriti all'interno degli imbuti.

Alla stazione di valle si è osservato che l'UPS era in standby e la stazione era alimentata direttamente dalla linea elettrica. Staccando la corrente di valle si è rilevato che l'UPS continuava a funzionare, mentre il resto della stazione si fermava. Spegnendo e riaccendendo l'UPS, senza ricollegare la corrente alla stazione, anche le altre apparecchiature riprendevano a funzionare. Si è quindi deciso di settare l'UPS nella modalità *Eco*, in cui quest'ultimo dovrebbe rimanere in bypass e attivarsi solo nel caso in cui la corrente sia insufficiente.

Finita l'attività nel sito di colata è stata fatta una visita agli uffici delle Regole a Cortina d'Ampezzo, dove è stato comunicato al segretario l'imminente montaggio della stazione intermedia, accordandosi per l'invio di una comunicazione in tal senso tramite mail.

Già la sera stessa l'UPS non è stato più raggiungibile tramite il protocollo http. Il protocollo Telnet era invece attivo ed è stato utilizzato per riattivare http.

1 agosto 2016

In tale data è stata fatta una visita presso l'ufficio dell'Ing. Lacedelli, responsabile dell'Ufficio Tecnico del Comune di Cortina d'Ampezzo, con cui è stato concordato di portare la corrente alla stazione intermedia tramite una linea aerea su pali in legno e supporto in corda d'acciaio.

Terminata la visita è stato raggiunto il Rio Acquabona, dove due operai della ditta addetta al montaggio della stazione intermedia avevano già iniziato a trasportare in loco il materiale per la fondazione. Mentre gli operai procedevano alla realizzazione della fondazione sono state trasportate fino alla stazione le parti della struttura metallica di quest'ultima.

Gli operai hanno realizzato in modo corretto la fondazione dell'armadietto della strumentazione, mentre la piastra di base è stata montata ruotata di circa 10° rispetto alle indicazioni date. Per risolvere questo problema si è concordato con gli operai di fare un nuovo foro nel perno su cui ruota tutta la struttura in modo da poter bloccare il braccio in una posizione migliore tramite una spina passante.

2 agosto 2016

La ditta ha completato il montaggio della stazione intermedia il 2 agosto (vedi *Figura 4.5*). Il cesto del contrappeso, che da progetto doveva essere appeso tramite catene in modo da essere più vicino possibile al suolo è stato montato sopra al braccio posteriore della struttura.



Figura 4.5: La struttura della stazione intermedia in posizione.

14 agosto 2016

Nelle ultime ore del 14 agosto 2016 si sono verificati due eventi di colata nel canale adiacente a quello in studio. Una colata ha interessato marginalmente il tratto stradale, la seconda è stata di maggiore entità. Si parla, infatti, in quest'ultimo caso di un fronte di circa 70 metri per tre metri di altezza (Fonte: Corriere delle Alpi, 15 agosto 2016).

19 agosto 2016

Nelle prime ore del mattino del 19 agosto, in concomitanza di un evento di colata di minor entità avvenuto sempre nel canale adiacente a quello in studio, la stazione di valle ha smesso di trasmettere.

Il capo elettricista del comune, contattato telefonicamente per verificare se si fosse

accorto di una interruzione dell'alimentazione presso la cabina di valle, ha sostenuto che, essendo collegato alla medesima cabina anche il sistema del canale adiacente e non essendo lui stato avvertito di nulla, il problema non poteva essere questo.

Si è quindi ritenuto opportuno recarsi sul luogo il giorno seguente per individuare la causa del malfunzionamento.

20 agosto 2016

Raggiunta la località Acquabona e aperta la cabina di valle, è stata immediatamente verificata l'assenza dell'alimentazione che è stata riattivata.

Alla stazione di valle l'UPS era completamente scarico, come doveva essere avendo coperto la mancanza dell'alimentazione di rete. L'UPS non ha indicato alcun malfunzionamento. Nel giro di circa tre ore si è ricaricato completamente.

È stata poi raggiunta la stazione intermedia, dove si è potuto constatare l'avvenuto montaggio, e il pluviometro di valle. Quest'ultimo riportava la data riferita al 1 gennaio 2000, come se fosse mancata l'alimentazione. La data del pluviometro è stata resettata e si è verificato il corretto funzionamento dello strumento.

9 settembre 2016

In tale data è stata effettuata un'uscita al fine di scaricare i dati dei pluviometri e verificarne il corretto funzionamento. Tutti gli strumenti sono stati trovati perfettamente puliti ed efficienti e i dati sono stati scaricati con successo.

17 settembre 2016

Nelle prime ore del 17 settembre si è verificato un evento di trasporto solido, ripreso dalla telecamera, che è andato a riempire nuovamente il solco creatosi in destra orografica del canale durante l'evento del 13 luglio 2016.

12 ottobre 2016

Il 12 ottobre 2016 è stata effettuata l'ultima uscita sul sito di studio e si è provveduto a smontare tutta la strumentazione.

Per primi sono stati smontati i tre pluviometri, dopo averne scaricato i dati. Si è poi proceduto a smontare la struttura della stazione intermedia. Questa operazione è stata complicata dal fatto che la spina che doveva impedire la rotazione del braccio si è piegata e per estrarla è stato necessario l'uso di un martello. Fatto salvo questo particolare lo smontaggio è avvenuto senza grossi problemi. Per ultima è stata smontata la stazione di valle. Anche in questo caso lo smontaggio non ha presentato problemi rilevanti. Smontata la stazione, tutta la strumentazione è stata riportata a valle, mentre gli elementi metallici della struttura sono stati lasciati in buon ordine avvolti in un telo vicino alla stazione.

Capitolo 5

Analisi degli eventi avvenuti durante il periodo di monitoraggio

All'interno di questo capitolo verranno analizzati gli eventi avvenuti durante l'arco temporale compreso fra il 20 aprile 2016 e il 12 ottobre dello stesso anno. La scelta del periodo è stata dovuta al fatto che gli eventi di colata che avvengono all'interno del sito del Rio Acquabona sono generalmente innescati da precipitazioni caratterizzate da elevate intensità in tempi brevi, tipiche della stagione estiva. Un altro fattore importante che ha determinato il periodo di monitoraggio è stata la possibilità di raggiungere in sicurezza le zone più in quota, che ancora ad aprile presentavano degli accumuli di neve lungo il percorso per raggiungere il pluviometro di monte e che dalla seconda metà di ottobre avrebbero potuto essere interessate da precipitazioni nevose.

La raccolta dei dati di precipitazione da parte dei pluviometri è avvenuta in maniera continuativa per tutto il periodo, mentre l'acquisizione di immagini da parte della telecamera della stazione di valle è avvenuta in maniera saltuaria dal 27 maggio al 12 luglio, mentre da questa data in poi l'acquisizione di immagini è avvenuta in maniera continua fino al 12 ottobre, salvo un'interruzione del funzionamento della stazione dovuta alla mancanza di corrente elettrica fra il 19 e il 20 agosto.

5.1 Eventi di precipitazione

5.1.1 Trattamento dei dati

I dati di precipitazione sono stati acquisiti tramite tre pluviometri a basculante modello M1-PLUV500 della ditta Tecnopenta s.r.l. di Teolo, PD. La superficie di raccolta è di 500 cm² e la risoluzione di 0.2 mm di pioggia. Lo strumento fornisce, in occasione di ogni basculata, giorno, mese, anno, ora, minuto e secondo, il valore cumulato della precipitazione e la tensione di alimentazione in volt. I tre strumenti sono stati posti in prossimità del canale di colata del Rio Acquabona a diversa quota in modo da poter cogliere in maniera efficace come variano gli eventi piovosi in funzione della posizione all'interno del sito di monitoraggio.

I dati scaricati dai pluviometri sono stati elaborati tramite un apposito software, realizzato in proprio, al fine di ottenere i valori di intensità di precipitazione e la precipitazione cumulata per determinate basi temporali ritenute significative. La determinazione della massima intensità è stata fatta, sempre tramite un software apposito realizzato in proprio, utilizzando il metodo della finestra mobile.

Si è notato che al momento dello smontaggio dei pluviometri, i tempi dell'ultima basculata di verifica non coincidevano con il tempo misurato dagli strumenti. Per correggere questo problema si è proceduto con il metodo di seguito riportato.

L'errore assoluto nel periodo di osservazione è definito come segue:

$$E_a = (t_v - t_{in}) - (t_p - t_{in}) = t_v - t_p,$$

dove t_v è il tempo vero, t_p è il tempo indicato dal pluviometro, t_{in} è il tempo di inizio acquisizione (all'istante di inizio acquisizione i due tempi coincidono).

L'errore relativo nel periodo di osservazione è definito come segue:

$$E_r = \frac{(t_v - t_{in}) - (t_p - t_{in})}{(t_p - t_{in})} = \frac{t_v - t_p}{(t_p - t_{in})}.$$

Nell'ipotesi di costanza dell'errore relativo nel tempo (possibile dipendenza da temperatura, umidità, tensione di alimentazione), il valore corretto del tempo strumentale vale:

$$t_{p_corretto} = t_p - E_r \cdot (t_p - t_{in}),$$

dove $t_{p_corretto}$ è il valore corretto del tempo da attribuire ai dati del pluviometro.

In *Tabella 5.1* sono riportati i dati utilizzati per la determinazione degli errori sul tempo dei dati acquisiti dai pluviometri.

	Basculata iniziale	Basculata finale		E_r
	$t_p=t_v$	t_p	t_v	
Pluv. di monte	20/04/2016 15:13	12/10/2016 10:13	12/10/2016 10:07	$2.702 \cdot 10^{-5}$
Pluv. intermedio	20/04/2016 12:43	12/10/2016 11:22	12/10/2016 11:21	$4.962 \cdot 10^{-6}$
Pluv. di valle	20/08/2016 12:09	12/10/2016 12:11	12/10/2016 12:12	$-1.747 \cdot 10^{-6}$

Tabella 5.1: dati utilizzati per la determinazione degli errori sul tempo dei dati acquisiti dai pluviometri.

5.1.2 Analisi dei dati di precipitazione sull'intero periodo di monitoraggio

All'interno di questo paragrafo verranno analizzati, considerando l'intero periodo di monitoraggio, i vari elementi presi in considerazione nello studio degli eventi di precipitazione.

Cumulata

Nel *Grafico 5.1* è possibile osservare, assieme all'intensità di precipitazione su base temporale di due minuti, la cumulata della precipitazione durante tutto il periodo di monitoraggio. I valori totali della cumulata sono rispettivamente: 698,8 mm per il pluviometro di monte, 665,8 mm per il pluviometro intermedio e 588,8 per quello di valle. Come si può notare c'è una notevole differenza (110 mm) fra il valore di monte e quello di valle, mentre il valore intermedio si attesta fra gli altri due, comunque più vicino al maggiore.

Un fatto che si può notare è che gli eventi in cui il valore della cumulata aumenta maggiormente non sono necessariamente collegati agli eventi che presentano un'elevata intensità in un breve periodo, come nel caso dei due minuti, mentre se si

prendono in considerazione basi temporali più ampie, come ad esempio tre giorni (vedi *Grafico 5.2*), è possibile osservare come la cumulata aumenti notevolmente in concomitanza degli eventi a intensità maggiore.

Ciò sta a indicare che gli eventi che portano il maggior contributo in termini di altezza di precipitazione, anche durante il periodo estivo, non sono gli scrosci d'acqua molto intensi e brevi, ma le precipitazioni con intensità più basse distribuite su un periodo più lungo. In Allegato 1 sono riportati i grafici di intensità e cumulata su tutto il periodo per diverse basi temporali.

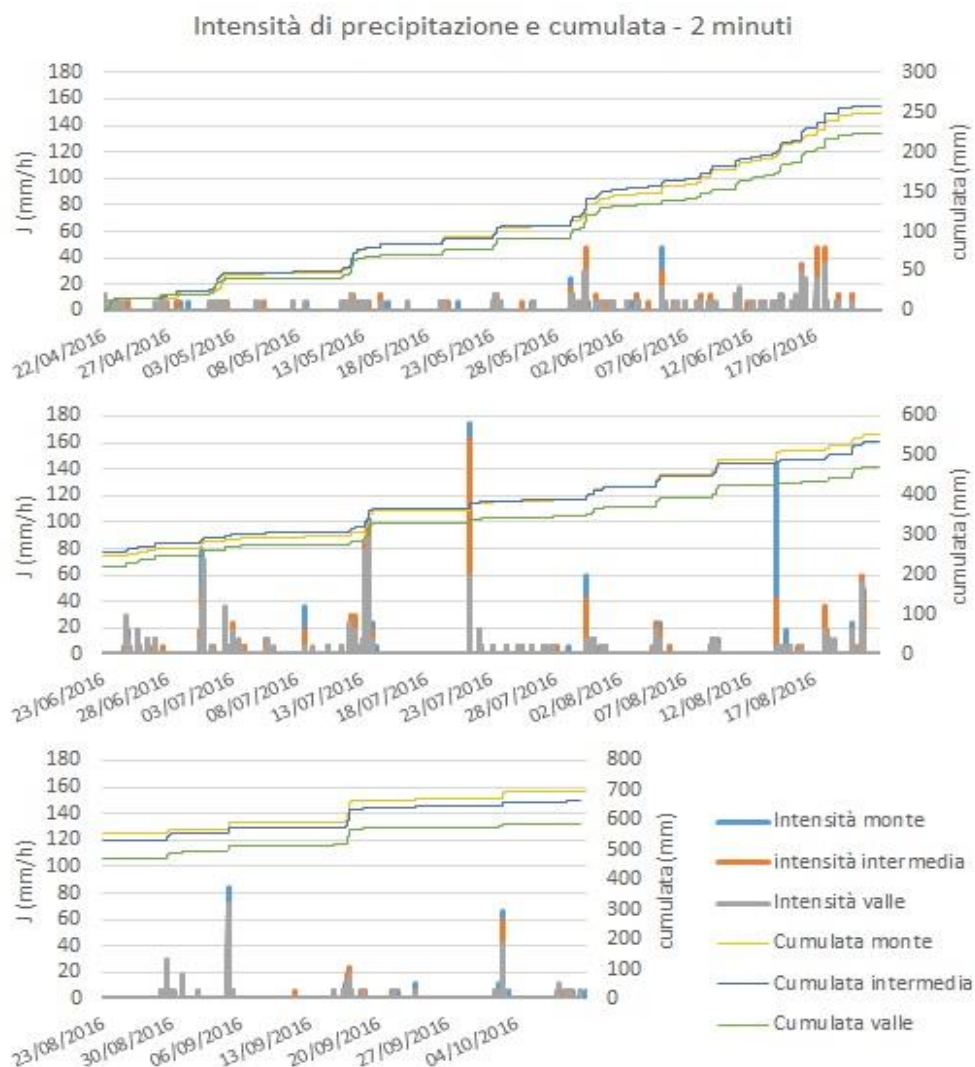


Grafico 5.1: Intensità di precipitazione su base temporale di 2 minuti e precipitazione cumulata durante il periodo di monitoraggio

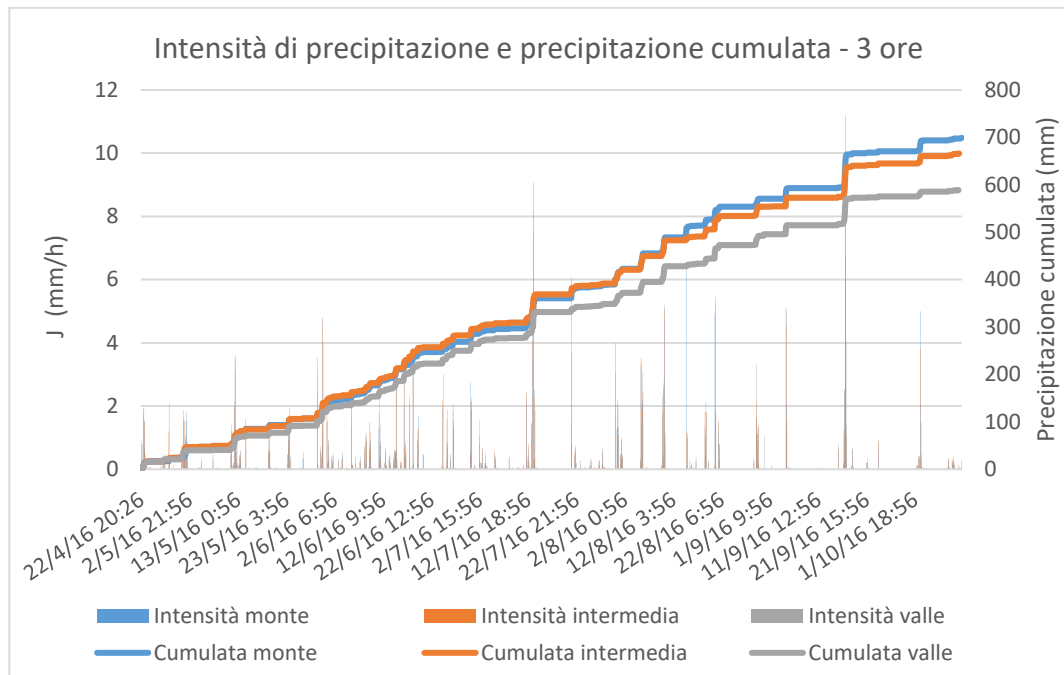


Grafico 5.2: Intensità di precipitazione su base temporale di 3 giorni e precipitazione cumulata durante il periodo di monitoraggio

Massima intensità

I valori di massima intensità sono stati calcolati tramite un apposito software, a partire dai dati “grezzi” dei pluviometri, utilizzando il metodo della finestra temporale mobile. Per questo risultano maggiori o uguali rispetto ai massimi valori ottenuti fissando un intervallo temporale per la finestra mobile e calcolando l’intensità sugli intervalli partendo dal momento iniziale di registrazione.

Nel Grafico 5.3 e in Tabella 5.2 sono riportati i valori della massima intensità misurata sull’intero periodo di monitoraggio misurati nei tre pluviometri per differenti finestre temporali.

Massima intensità						
	Monte		Intermedio		Valle	
	J_{max} (mm/h)	Inizio Precip.	J_{max} (mm/h)	Inizio Precip.	J_{max} (mm/h)	Inizio Precip.
1 min.	228.00	21/07/2016 20:31:07	204.00	21/07/2016 20:27:34	108.00	13/07/2016 21:34:29
2 min.	198.00	21/07/2016 20:30:20	156.00	21/07/2016 20:26:56	96.00	13/07/2016 21:34:04
5 min.	141.60	21/07/2016 20:29:39	93.60	21/07/2016 20:26:08	76.80	13/07/2016 21:31:14
10 min.	114.00	14/08/2016 21:00:09	56.40	13/07/2016 21:29:43	51.60	13/07/2016 21:28:07
15 min.	76.80	14/08/2016 21:00:09	44.00	21/07/2016 20:17:05	38.40	13/07/2016 21:25:27
30 min.	38.80	14/08/2016 21:00:09	28.00	13/07/2016 21:16:05	28.00	13/07/2016 21:15:55
45 min.	26.13	13/07/2016 21:28:53	21.60	13/07/2016 21:25:33	25.87	13/07/2016 21:25:27
1 ora	23.80	13/07/2016 21:19:52	20.20	13/07/2016 21:16:05	23.20	13/07/2016 21:15:55
3 ore	9.07	13/07/2016 20:57:17	7.40	13/07/2016 20:56:14	8.13	13/07/2016 20:56:27
6 ore	5.30	13/07/2016 20:57:17	4.43	13/07/2016 20:56:14	4.33	13/07/2016 16:16:50
12 ore	3.73	13/07/2016 15:00:18	3.25	13/07/2016 11:03:55	3.18	13/07/2016 10:55:31
24 ore	2.20	13/07/2016 10:59:45	1.96	13/07/2016 04:04:49	1.85	13/07/2016 10:55:31
2 giorni	1.30	12/07/2016 10:20:41	1.22	12/07/2016 10:17:19	1.13	12/07/2016 10:19:07
3 giorni	0.88	11/07/2016 18:26:03	0.82	11/07/2016 18:10:16	0.76	11/07/2016 18:11:34
4 giorni	0.66	10/07/2016 16:31:17	0.62	10/07/2016 16:13:38	0.57	10/07/2016 16:10:55
5 giorni	0.55	05/08/2016 09:42:36	0.51	05/08/2016 09:37:59	0.46	09/07/2016 10:23:26

Tabella 5.2: Valori della massima intensità sul periodo di monitoraggio misurati nei tre pluviometri per differenti finestre temporali. Nel caso vi fossero due massimi uguali, il programma fornisce il primo in ordine temporale.

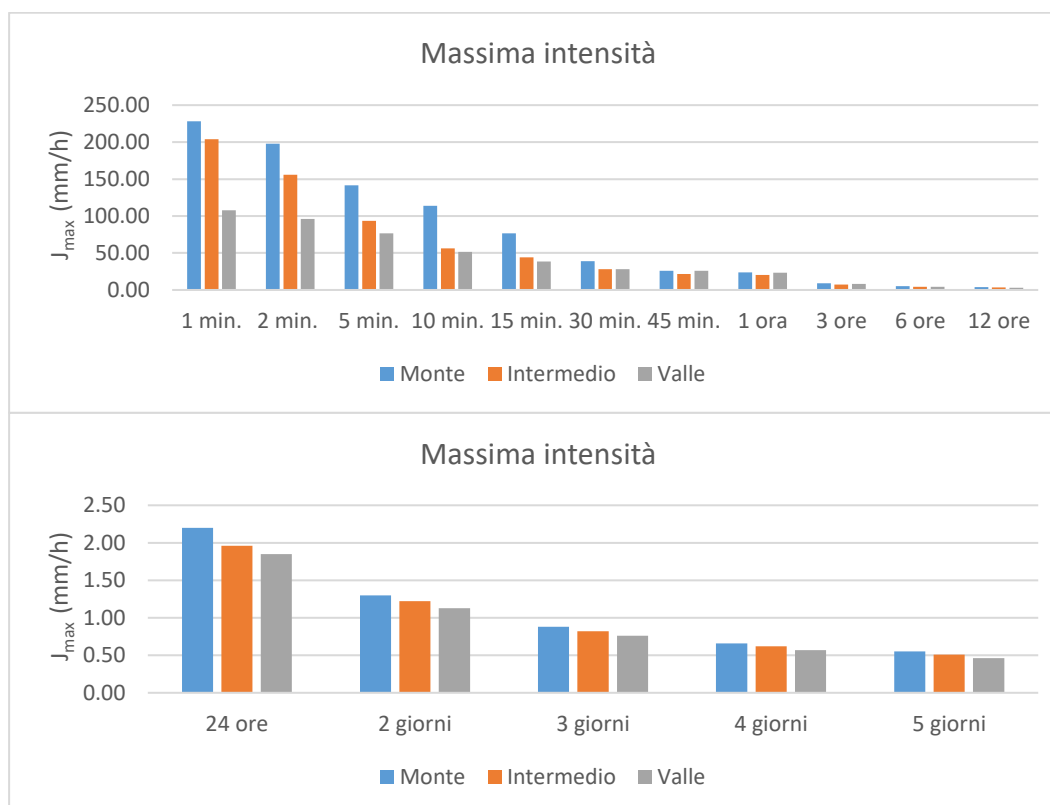


Grafico 5.3: Valori della massima intensità sul periodo di monitoraggio misurati nei tre pluviometri per differenti finestre temporali.

Ciò che si nota immediatamente è che, per le finestre temporali inferiori ai 30 minuti, il pluviometro di monte presenta un valore massimo dell'intensità circa doppio rispetto a quello di valle, mentre i valori del pluviometro intermedio, se per i periodi più brevi (uno e due minuti) sono più vicini a quelli di monte, aumentando la durata della finestra temporale tendono ad avvicinarsi maggiormente a quelli di valle.

Per finestre temporali più ampie il pluviometro di monte registra sempre valori massimi della precipitazione maggiori, ma la differenza è meno marcata.

Concordanza

Questo parametro è stato analizzato in quanto è in grado di esprimere in maniera efficace se vi è una correlazione fra le precipitazioni misurate dai diversi pluviometri. Per ottenerlo sono stati creati dei grafici a dispersione (vedi *Grafico 5.5*) i cui assi indicano rispettivamente le intensità misurate da due diversi pluviometri. In questo modo, ogni evento misurato da entrambi i pluviometri dà origine, quanto più presenta un'intensità simile nei due siti di misura, a un punto sul grafico tanto più vicino alla bisettrice del primo quadrante.

Per ognuno dei grafici così ottenuti è stata mostrata la retta di regressione e ne sono stati calcolati il coefficiente angolare m e il coefficiente di determinazione R^2 . Quest'ultimo è un parametro che varia fra 0 ed 1 ed esprime quanto un modello utilizzato (in questo caso la retta di regressione) ben descrive una serie di dati. La concordanza è tanto maggiore quanto più entrambi questi due parametri si avvicinano al valore di 1.

Dalla *Tabella 5.3* e dal *Grafico 5.4* si può osservare come i valori di m ed R^2 siano estremamente bassi per tempi di riferimento brevi, mentre per tempi più lunghi si avvicinano ad 1. Ciò significa che all'interno del sito di studio vi è una forte variabilità dell'intensità sui tempi brevi, mentre per i tempi più lunghi gli eventi di precipitazione hanno un comportamento più uniforme.

Come era facilmente prevedibile la concordanza è molto più bassa fra monte e valle che non fra il pluviometro di monte e quello intermedio o il pluviometro intermedio e quello di valle.

Nell’Allegato 2 sono riportati ulteriori grafici di concordanza fra le varie stazioni per diversi tempi di riferimento.

Concordanza						
	Monte/valle		Monte/intermedia		Intermedia/valle	
	R ²	m	R ²	m	R ²	m
1 minuto	0.03	0.26	0.06	0.21	0.08	0.34
10 minuti	0.16	0.56	0.47	0.58	0.39	0.57
15 minuti	0.24	0.67	0.59	0.91	0.48	0.80
30 minuti	0.52	0.94	0.77	1.03	0.78	0.97
1 ora	0.59	0.98	0.86	1.07	0.76	0.96
3 ore	0.80	1.08	0.90	1.06	0.92	1.04
6 ore	0.84	1.13	0.92	1.06	0.95	1.08
12 ore	0.87	1.13	0.93	1.06	0.97	1.08
1 giorno	0.86	1.13	0.93	1.06	0.97	1.09
3 giorni	0.86	1.13	0.92	1.03	0.97	1.11

Tabella 5.3 :Valori del coefficiente di determinazione R² e del coefficiente angolare della concordanza per diversi tempi di riferimento.

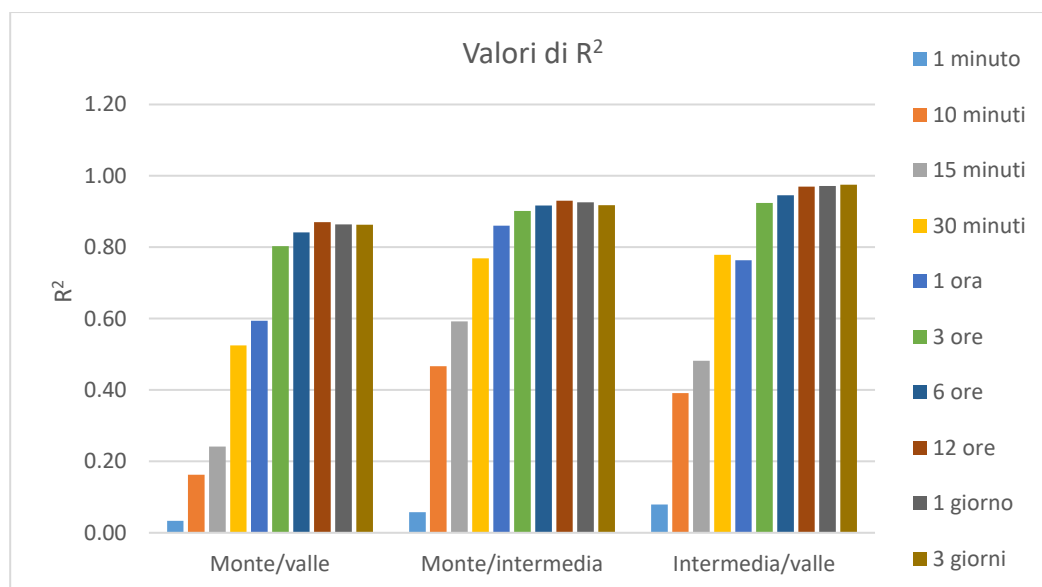


Grafico 5.4: valori del coefficiente di determinazione, R², della concordanza, per diversi periodi di riferimento.

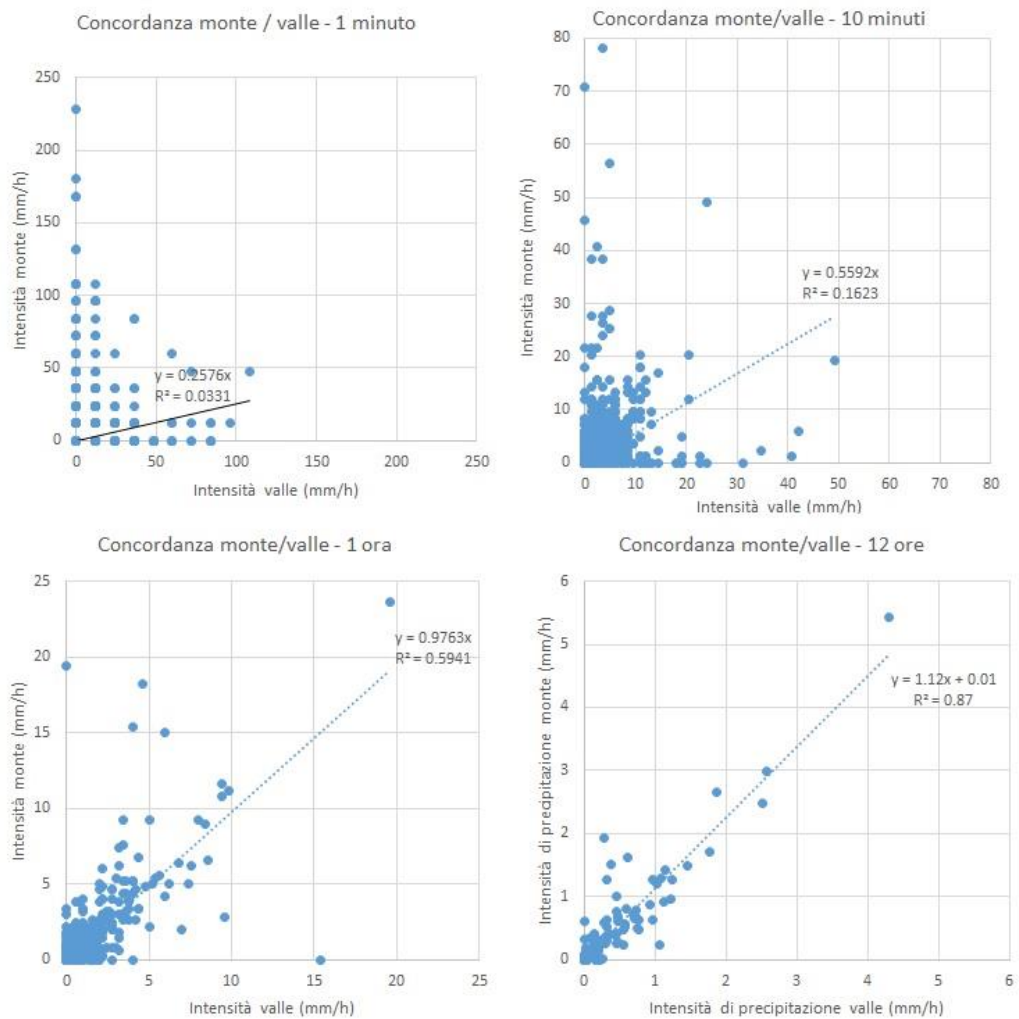


Grafico 5.5: Esempi di grafici di concordanza fra il pluviometro di monte e quello di valle per diversi tempi di riferimento.

Frequenza delle intensità di precipitazione

Un altro parametro che si è deciso di prendere in considerazione è la frequenza delle diverse intensità di precipitazione per diversi tempi di riferimento.

Per fare ciò si è fatto ricorso alla seguente formula:

$$f(J_i) = \frac{n_i}{N}$$

Dove $f(J_i)$ è la frequenza di un determinato valore di intensità, n_i indica la numerosità di intervalli temporali caratterizzati da questo valore e N è il numero totale di intervalli temporali analizzati. Nel Grafico 5.6 sono riportate a titolo di

esempio le distribuzioni di frequenza delle intensità di precipitazione per gli intervalli temporali di dieci minuti e tre giorni. I grafici per i tempi restanti sono riportati nell'Allegato 3.

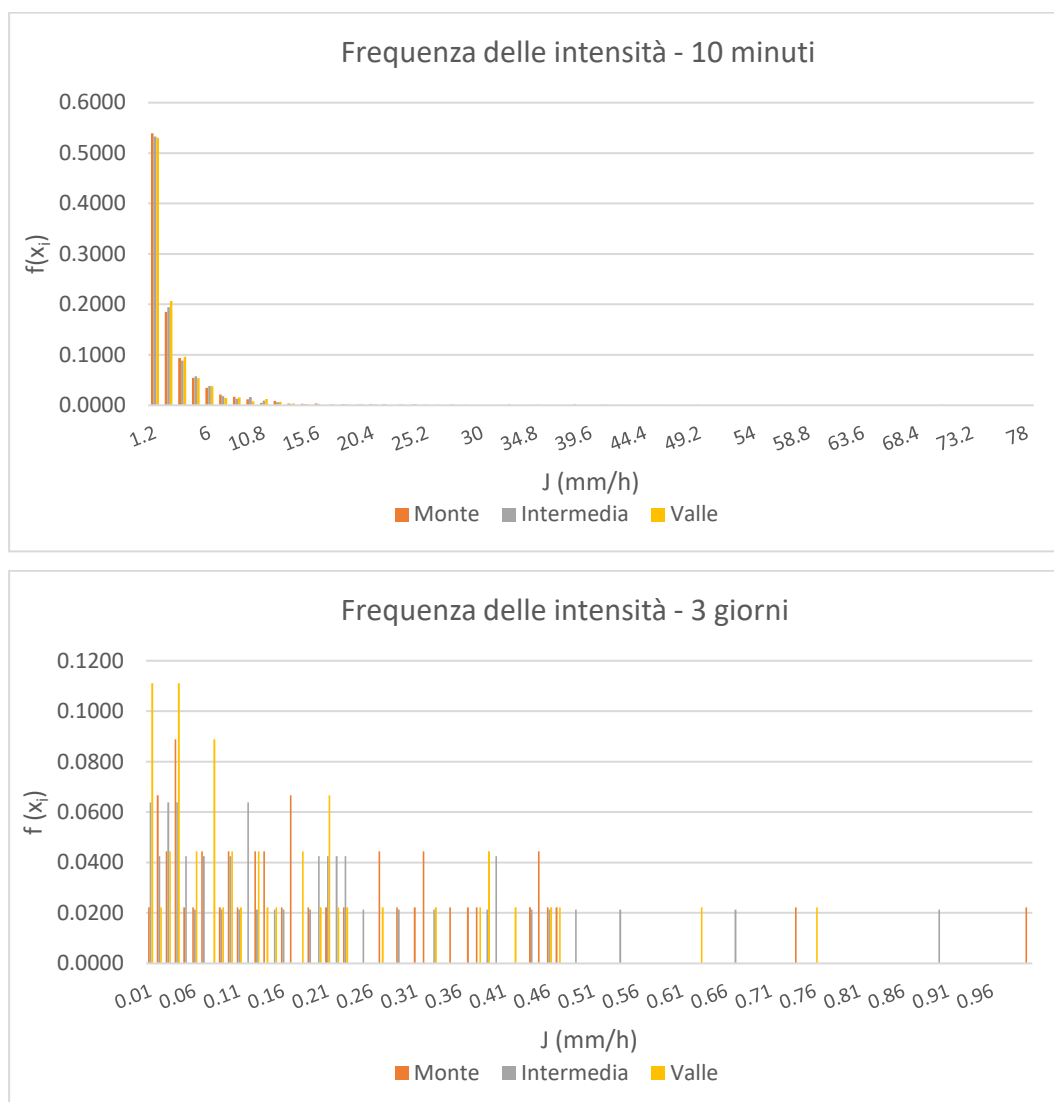


Grafico 5.6: Distribuzione della frequenza delle intensità di precipitazione per le basi temporali di 10 minuti e tre giorni.

Ciò che si può osservare è che, per tempi di riferimento brevi, i valori sono concentrati, anche per più della metà, nel valore di intensità minimo misurabile dallo strumento, mentre, come è facilmente prevedibile, valori di intensità molto

alti hanno frequenza molto bassa. Prendendo in considerazione tempi di riferimento più ampi, invece, si può notare che vi è ancora un maggior numero di intervalli temporali con intensità bassa, ma la differenza in frequenza con intervalli a intensità maggiore è molto meno marcata.

Per comprendere meglio come varia la distribuzione delle intensità, si è deciso di calcolare, per ogni campione corrispondente ad una base temporale, i seguenti parametri:

- Il momento di primo ordine rispetto all'origine, ovvero la media aritmetica $m(J)$, così calcolata:

$$m(J) = \sum_{i=1}^N J_i f(J_i)$$

- Il momento di secondo ordine rispetto alla media, cioè la varianza $m_2(J)$, calcolata secondo la formula seguente:

$$m_2(J) = \sum_{i=1}^N [J_i - m(J)]^2 f(J_i)$$

- La radice quadrata della varianza, detta scarto quadratico medio $s(J)$, così definito:

$$s(J) = \sqrt{m_2(J)}$$

- Per avere dei valori fra loro confrontabili anche su basi temporali diverse si è deciso utilizzare il coefficiente di variazione $CV(J)$ che si ottiene normalizzando lo scarto quadratico medio con la media aritmetica secondo la formula seguente:

$$CV(J) = \frac{s(J)}{m(J)}$$

- Il momento del terzo ordine, calcolato tramite la seguente formula:

$$m_3(J) = \sum_{i=1}^N [J_i - m(J)]^3 f(J_i)$$

La varianza e lo scarto quadratico medio esprimono una misura di quanto gli elementi del campione si discostano dalla media aritmetica di quest'ultimo. Può avere valori soltanto positivi e ad un valore di zero corrisponde un campione in cui tutti i singoli elementi hanno valore pari alla media. Considerando la sommatoria dei quadrati delle differenze fra i singoli valori e la media aritmetica del campione moltiplicati per la loro frequenza, consegue che gli elementi del campione che si discostano molto dalla media, anche se con bassa frequenza, incidono molto.

Il momento del terzo ordine, invece, esprime la simmetria della distribuzione dei dati all'interno del campione. In questo caso il parametro può avere sia valori positivi che negativi: i valori positivi stanno a indicare che il campione è più sbilanciato verso destra rispetto alla media, mentre i valori negativi indicano che il campione è sbilanciato più verso sinistra. Anche in questo caso, considerando il cubo della differenza fra i singoli valori e la media aritmetica del campione, avviene che gli elementi del campione con valori estremi vadano ad influire in maniera significativa nonostante la loro scarsa frequenza.

2 minuti			10 minuti			1 ora		
Monte	Intermedio	valle	Monte	Intermedio	valle	Monte	Intermedio	valle
m(J) (mm/h)			m(J) (mm/h)			m(J) (mm/h)		
8.19	7.83	7.57	3.22	3.06	2.88	1.49	1.43	1.37
CV (J)			CV (J)			CV (J)		
1.13	0.80	0.78	1.62	1.33	1.21	1.69	1.47	1.46
m ₃ (J) (mm/h) ³			m ₃ (J) (mm/h) ³			m ₃ (J) (mm/h) ³		
7141.113	2970.088	1460.599	1038.940	381.237	218.251	69.893	32.619	31.625
6 ore			12 ore			3 giorni		
Monte	Intermedio	valle	Monte	Intermedio	valle	Monte	Intermedio	valle
m(J) (mm/h)			m(J) (mm/h)			m(J) (mm/h)		
0.49	0.55	0.55	0.39	0.32	0.23	0.21	0.20	0.17
CV (J)			CV (J)			CV (J)		
1.81	1.49	1.40	1.54	1.36	1.64	0.96	0.98	1.00
m ₃ (J) (mm/h) ³			m ₃ (J) (mm/h) ³			m ₃ (J) (mm/h) ³		
1.493	1.247	0.991	0.451	0.171	0.207	0.014	0.011	0.008

Tabella 5.4: Valori di media, coefficiente di variazione e momento del terzo ordine della intensità di precipitazione per i dati registrati nei tre pluviometri durante tutto l'anno per diversi periodi di riferimento.

In *Tabella 5.4* sono riportati i valori di media, coefficiente di variazione e momento del terzo ordine della intensità di precipitazione per i dati registrati dai tre pluviometri durante tutto l'anno, per i tempi di riferimento di due minuti, dieci minuti, un'ora, sei ore, dodici ore e tre giorni.

Si può notare che, se i valori dei massimi di intensità variano molto fra i tre pluviometri, i valori medi sono molto più simili fra loro, anche se comunque a monte i valori tendono a essere leggermente più alti.

Il coefficiente di variazione è molto elevato nei tempi brevi, mentre aumentando il periodo di riferimento si abbassa notevolmente. Il fatto che per le basi temporali più brevi siano presenti eventi di intensità estrema che, seppur rari, si discostano molto dalla media fa sì che il coefficiente di variazione aumenti in maniera considerevole. Lo stesso vale per il momento del terzo ordine: anch'esso presenta valori estremamente elevati per tempi di riferimento brevi, mentre si riduce di molto, avvicinandosi allo zero, per i tempi più lunghi. Concordando con l'osservazione dei grafici di frequenza, il momento del terzo ordine presenta sempre valori positivi.

Frequenza cumulata di non superamento

Un altro parametro analizzato è la frequenza cumulata di non superamento dell'intensità di precipitazione. È stata ottenuta ponendo, per i dati misurati da ogni pluviometro per diversi tempi di riferimento, dei valori-limite di intensità crescenti e contando il numero di intervalli temporali che presentavano valori inferiori. In questo modo è stato possibile ricostruire le curve della frequenza cumulata di non superamento per diversi tempi di riferimento. Nel *Grafico 5.7* sono riportate le curve della frequenza cumulata di non superamento dei valori di intensità nei tre pluviometri per un intervallo di riferimento di 10 minuti.

Ciò che si può osservare da queste curve è che la maggior parte degli intervalli di tempo in cui si verificano dei fenomeni di precipitazione hanno intensità molto basse: nel caso dei dieci minuti, ad esempio si nota che più della metà dei valori di intensità misurati corrisponde alla minima intensità misurabile dallo strumento e pari a 1,2 mm/h.

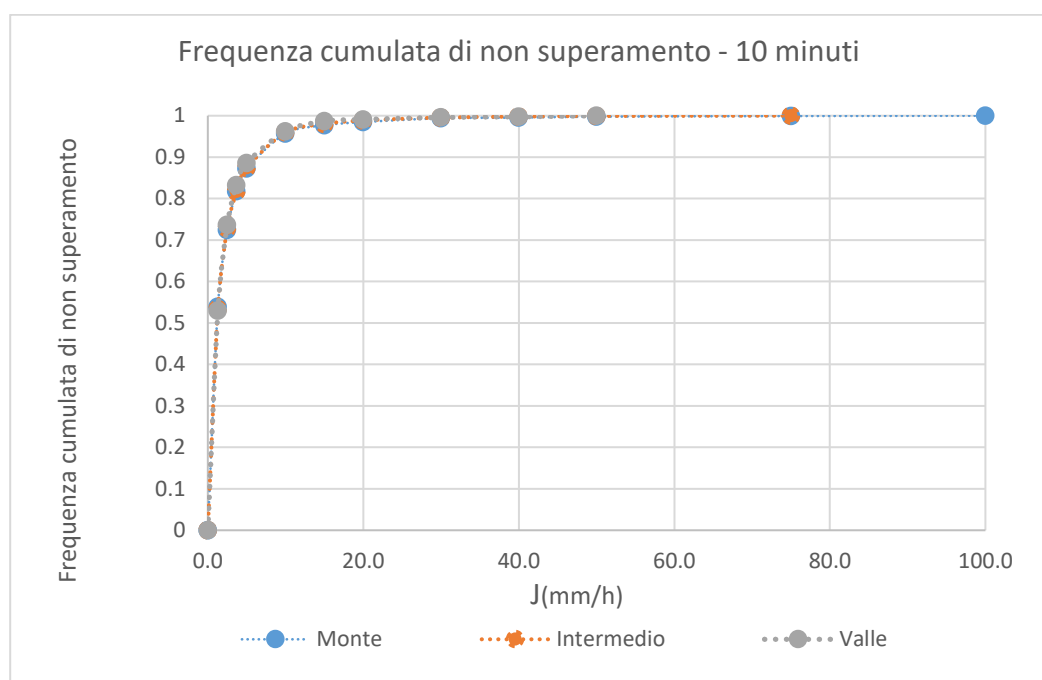


Grafico 5.7 Frequenza cumulata di non superamento dei valori di intensità nei tre pluviometri per un intervallo di riferimento di 10 minuti.

Considerazioni conclusive sull'analisi delle precipitazioni durante tutto il periodo di monitoraggio

Dopo aver analizzato tutti gli elementi fin qui visti è possibile trarre alcune conclusioni sulle precipitazioni avvenute all'interno del sito di monitoraggio del Rio Acquabona nel periodo compreso fra il 20 aprile e il 12 ottobre 2016.

Dalla cumulata si osserva come a monte sia caduta una quantità di pioggia maggiore rispetto alle zone dove sono collocati gli altri due pluviometri. Si è inoltre potuto notare come gli eventi che maggiormente contribuiscono a far aumentare la precipitazione cumulata non siano quelli con le maggiori intensità, che si sviluppano in tempi molto brevi, ma quelli con intensità minori e distribuiti su un arco temporale più lungo.

Si rileva che i valori di massima intensità sono maggiori a monte rispetto alla zona dove si trova il pluviometro intermedio e a valle. Questa differenza è estremamente marcata se si considerano intervalli temporali piccoli, per i quali la massima

intensità a monte è doppia rispetto a quella di valle, mentre se si considerano periodi più lunghi la differenza si attenua.

Anche per quanto riguarda la concordanza fra i tre pluviometri si può facilmente notare come sul breve periodo non vi sia corrispondenza fra gli eventi che avvengono nei tre siti di misurazione, mentre se si considerano tempi maggiori la concordanza è molto elevata.

Infine, si può osservare che la maggior parte degli eventi che avvengono hanno intensità molto bassa. Tuttavia, soprattutto considerando intervalli di tempo brevi, gli eventi estremi si scostano molto dalla media e quindi vanno ad influenzare notevolmente la distribuzione delle intensità.

5.1.3 Analisi degli eventi di precipitazione più significativi avvenuti durante il periodo di monitoraggio

Per classificare gli eventi di precipitazione avvenuti durante il periodo di monitoraggio, dal 20 aprile 2016 al 12 ottobre 2016, si è deciso di usare come riferimento una base temporale di dieci minuti. All'interno di questa base temporale sono state stabilite le seguenti cinque classi di eventi basate sull'intensità massima:

- A. Eventi che al loro interno contengono almeno un intervallo temporale su almeno uno dei tre pluviometri con un valore di intensità compreso fra 3 mm/h e 5 mm/h.
- B. Eventi che al loro interno contengono almeno un intervallo temporale su almeno uno dei tre pluviometri con un valore di intensità compreso fra 5 mm/h e 10 mm/h.
- C. Eventi che al loro interno contengono almeno un intervallo temporale su almeno uno dei tre pluviometri con un valore di intensità compreso fra 10 mm/h e 20 mm/h.
- D. Eventi che al loro interno contengono almeno un intervallo temporale su almeno uno dei tre pluviometri con un valore di intensità compreso fra 20 mm/h e 50 mm/h.
- E. Eventi che al loro interno contengono almeno un intervallo temporale su almeno uno dei tre pluviometri con un valore di intensità maggiore di 50 mm/h.

Gli eventi così classificati sono stati numerati in maniera sequenziale, su base cronologica, senza tener conto della classe di appartenenza. Durante tutto l'arco di tempo considerato sono stati contati 79 eventi così distribuiti (vedi Allegato 4):

- 32 eventi di classe A;
- 19 eventi di classe B;
- 12 eventi di classe C;
- 13 eventi di classe D;
- 3 eventi di classe E.

Per tutti gli eventi delle classi C, D, E si è proceduto a controllare le immagini acquisite presso la stazione di valle per verificare se da queste si potessero osservare fenomeni di scorrimento superficiale o di trasporto solido. In *Figura 5.1* è riportato come esempio un fotogramma acquisito dalla telecamera durante un evento notturno di intensità elevata.



Figura 5.1: Fotogramma acquisito presso la stazione di valle durante un evento notturno, il numero 50 del 13 luglio 2016, di intensità elevata.

Si è deciso di analizzare nel dettaglio gli eventi delle ultime due classi, ovvero quelli che presentano delle intensità massime, in almeno uno dei tre pluviometri, superiori a 20 mm/h per un intervallo di riferimento di 10 minuti.

Per ognuno di questi eventi, per ogni pluviometro, sono stati ottenuti i seguenti parametri: ora di inizio dell'evento, ora di fine dell'evento, totale dell'altezza di precipitazione del singolo evento h_{tot} , intensità massima J_{max} , intensità media $m(J)$, scarto quadratico medio dell'intensità $s(J)$, momento di terzo ordine dell'intensità $m_3(J)$.

Oltre a questi parametri, già visti in precedenza per le precipitazioni sull'intero periodo, si è deciso di analizzare come le singole precipitazioni si comportano in funzione del tempo rispetto all'altezza di precipitazione, e di conseguenza dell'intensità. Per fare ciò sono stati introdotti i seguenti parametri:

- Il parametro $f(t_i)$, che esprime il peso di un singolo intervallo temporale in funzione dell'altezza di precipitazione h_i , e di conseguenza dell'intensità, del singolo intervallo normalizzato rispetto all'altezza di precipitazione totale dell'evento h_{tot} , definito tramite la formula:

$$f(t_i) = \frac{h_i}{h_{tot}}$$

- momento del primo ordine del tempo $m(t)$ in funzione dell'altezza di precipitazione, definito come:

$$m(t) = \sum_{i=1}^N t_i f(t_i)$$

- Scarto quadratico medio del tempo rispetto a $m(t)$ in funzione dell'altezza di precipitazione, calcolato nel seguente modo:

$$s(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (t_i - m(t))^2 f(t_i)}$$

- Momento del terzo ordine del tempo $m_3(t)$ rispetto a $m(t)$ in funzione dell'altezza di precipitazione, così ottenuto:

$$m_3(t) = \sum_{i=1}^N (t_i - m(t))^3 f(t_i)$$

Oltre a ciò, per ogni evento è stato verificato, attraverso l'osservazione dei fotogrammi rilevati presso la stazione di valle, se sono avvenuti fenomeni di trasporto solido o trasporto liquido all'interno del canale.

Al momento del primo ordine può essere assegnato il significato di tempo caratteristico della precipitazione.

Lo scarto quadratico medio del tempo, rispetto a $m(t)$, fornisce una indicazione di quanto la precipitazione è distribuita nel tempo.

Il momento del terzo ordine del tempo rispetto a $m(t)$, descrive la asimmetria nel tempo della precipitazione: valori negativi indicano che l'altezza di precipitazione, e di conseguenza l'intensità, è maggiormente sbilanciata verso sinistra; valori positivi, al contrario, indicano uno sbilanciamento verso destra.

Di seguito vengono discussi singolarmente, su base temporale di due minuti, gli eventi, fra quelli selezionati, che sono stati ritenuti più significativi.

Per poter fare un confronto sul comportamento dei singoli eventi a prescindere dalla misura delle loro intensità, nei grafici che seguono, sull'asse delle ordinate è riportata l'intensità normalizzata rispetto all'intensità media, J_{norm} , così definita:

$$J_{norm} = \frac{J_i}{m(J)}$$

Evento 15

Evento 15 - 2 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	30/5/16 14:30	30/5/16 14:33	30/5/16 14:39
Ora fine	30/5/16 19:00	30/5/16 19:03	30/5/16 19:07
h_{tot} (mm)	16.60	18.20	16.00
J_{max} (mm/h)	36.00	48.00	30.00
$m(J)$ (mm/h)	3.67	3.99	3.56
$s(J)$ (mm/h)	7.10	7.44	5.93
$m_3(J)$ (mm/h) ³	900.25	1266.18	486.14
$m(t)$	30/5/16 17:51	30/5/16 17:43	30/5/16 17:43
$s(t)$ (h)	0.930	1.044	1.137
$m_3(t)$ (h ³)	-1.572024	-1.719565	-2.012535
Trasporto solido	ND		
Trasporto liquido	ND		
Assenza di trasporto	ND		

Tabella 5.5: Parametri dell'evento 15.

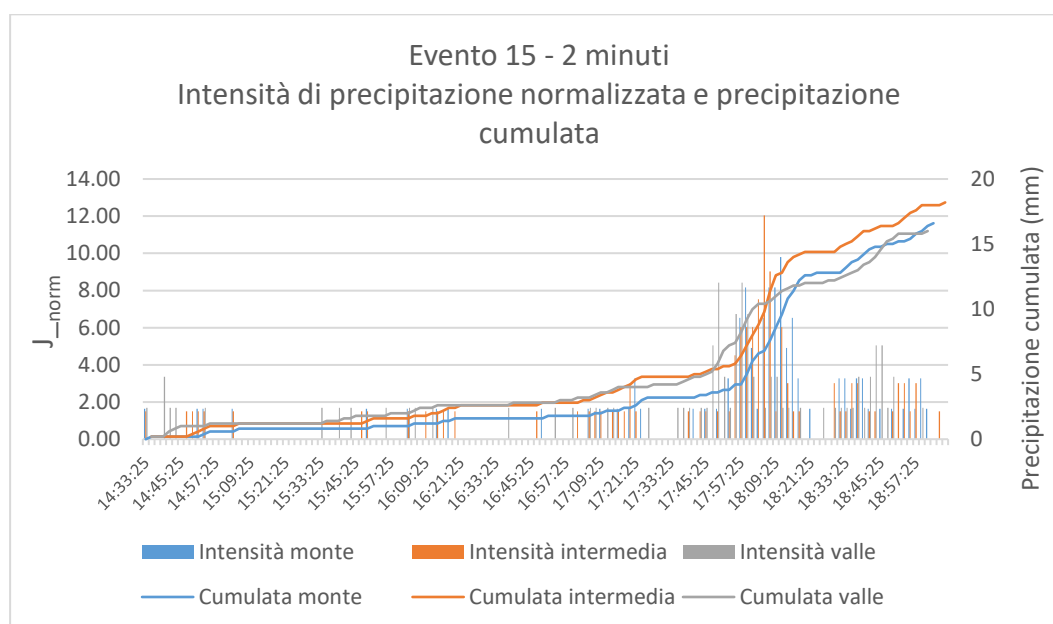


Grafico 5.8: Intensità di precipitazione e cumulata dell'evento 15.

Dal *Grafico 5.8* si nota che l'evento avvenuto il 30 maggio 2016 inizia alle 14:26 con intensità molto basse per avere un picco fra le 17:50 e le 18:30 e poi concludersi diminuendo di intensità. La durata totale è di circa quattro ore e mezza.

In *Tabella 5.5* è possibile osservare che sono stati registrati dei massimi di intensità compresi fra i 48,0 mm/h del pluviometro intermedio e i 30,0 mm/h del pluviometro di valle, mentre l'altezza di pioggia caduta è compresa fra 18,2 mm al pluviometro intermedio e 16,6 mm ai pluviometri di monte e valle.

La media dell'intensità varia fra 3,6 mm/h e 3,9 mm/h. Il valore di $m_3(J)$ è positivo in tutti e tre i casi. Ciò, unito ai valori di $s(J)$, conferma il fatto che il pluviometro intermedio ha registrato dei valori di intensità che si scostano maggiormente dalla media e che in tutti i casi la distribuzione dei valori di intensità è spostata più a destra rispetto alla media.

Il momento del primo ordine in funzione dell'altezza di precipitazione $m(t)$, come si può facilmente intuire osservando il *Grafico 5.8*, è spostato nella seconda metà dell'evento.

I valori di $s(t)$ sono nell'ordine dell'ora, mentre il momento del terzo ordine $m_3(t)$ presenta valori negativi, indicando uno sbilanciamento delle altezze di precipitazione (e conseguentemente delle intensità) verso sinistra.

Quando questo evento si è verificato la telecamera non era in funzione, pertanto non sono disponibili informazioni riguardo eventuali fenomeni di trasporto solido o liquido all'interno del canale.

Evento 19

Evento 19 - 2 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	5/6/16 18:42	5/6/16 18:41	5/6/16 18:55
Ora fine	5/6/16 20:02	5/6/16 20:03	5/6/16 20:21
h_{tot} (mm)	7.60	6.20	4.00
J_{max} (mm/h)	48.00	30.00	18.00
$m(J)$ (mm/h)	5.55	4.54	2.79
$s(J)$ (mm/h)	9.98	7.59	4.55
$m_3(J)$ (mm/h) ³	2678.08	961.81	176.88
$m(t)$	5/6/16 19:01	5/6/16 19:05	5/6/16 19:26
$s(t)$ (h)	0.335	0.358	0.489
$m_3(t)$ (h ³)	0.061709	0.063765	0.056063
Trasporto solido	ND		
Trasporto liquido	ND		
Assenza di trasporto	ND		

Tabella 5.6: Parametri dell'evento 19.

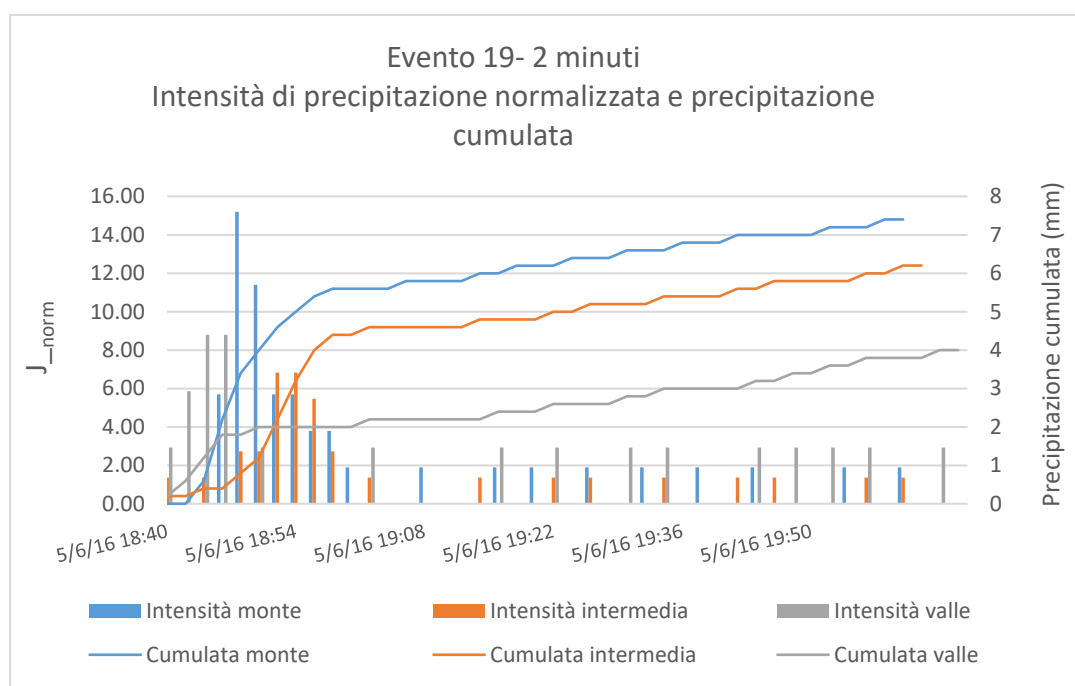


Grafico 5.9: Intensità di precipitazione e cumulata dell'evento 19.

L'evento 19, come si può osservare in *Tabella 5.6*, è avvenuto il 5 giugno 2016. È iniziato alle 18:41 al pluviometro intermedio per concludersi definitivamente a valle alle 20:21.

Dal *Grafico 5.9* si può osservare come l'evento inizi con una prima fase di maggior intensità che dura circa mezz'ora per poi esaurirsi con un'intensità molto più bassa nel giro di un'ora.

I massimi di intensità registrati variano dai 48,0 e 30,0 mm/h del pluviometro intermedio e di monte ai 18,0 mm/h di quello di valle: quasi la metà.

L'altezza di precipitazione è maggiore a monte e anche in questo caso ha un valore quasi doppio di quello di valle. Lo stesso vale per la media dell'intensità.

Lo scarto quadratico medio e il momento del terzo ordine della intensità di precipitazione sono molto maggiori a monte e al pluviometro intermedio che a valle. A valle la variabilità della intensità di precipitazione è inferiore rispetto alla variabilità misurata a monte e al pluviometro intermedio, cosa intuibile anche osservando il *Grafico 5.9*.

Il momento del primo ordine del tempo di precipitazione in funzione dell'altezza di precipitazione, come si può facilmente prevedere guardando il *Grafico 5.9*, è situato nella prima metà dell'evento. La varianza del tempo di precipitazione ha valori dell'ordine di venti minuti, mezz'ora. Il momento del terzo ordine in funzione dell'altezza di precipitazione presenta valori positivi, indicando uno sbilanciamento delle altezze di precipitazione (e conseguentemente delle intensità) verso destra.

Anche durante questo evento non sono state acquisite immagini tramite la telecamera, pertanto non è possibile dire se si sono verificati fenomeni di trasporto.

Evento 50

Evento 50 - 2 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	13/7/16 20:56	13/7/16 20:55	13/7/16 20:55
Ora fine	13/7/16 22:50	13/7/16 22:15	13/7/16 22:25
h_{tot} (mm)	27.00	22.40	24.60
J_{max} (mm/h)	102.00	96.00	90.00
$m(J)$ (mm/h)	13.86	16.39	16.04
$s(J)$ (mm/h)	22.70	23.11	22.31
$m_3(J)$ (mm/h) ³	27480.87	21964.55	20326.89
$m(t)$	13/7/16 21:41	13/7/16 21:37	13/7/16 21:42
$s(t)$ (h)	0.372	0.335	0.318
$m_3(t)$ (h ³)	0.010252	0.003876	-0.002272
Trasporto solido	SI		
Trasporto liquido	SI		
Assenza di trasporto	NO		

Tabella 5.7: Parametri dell'evento 50.

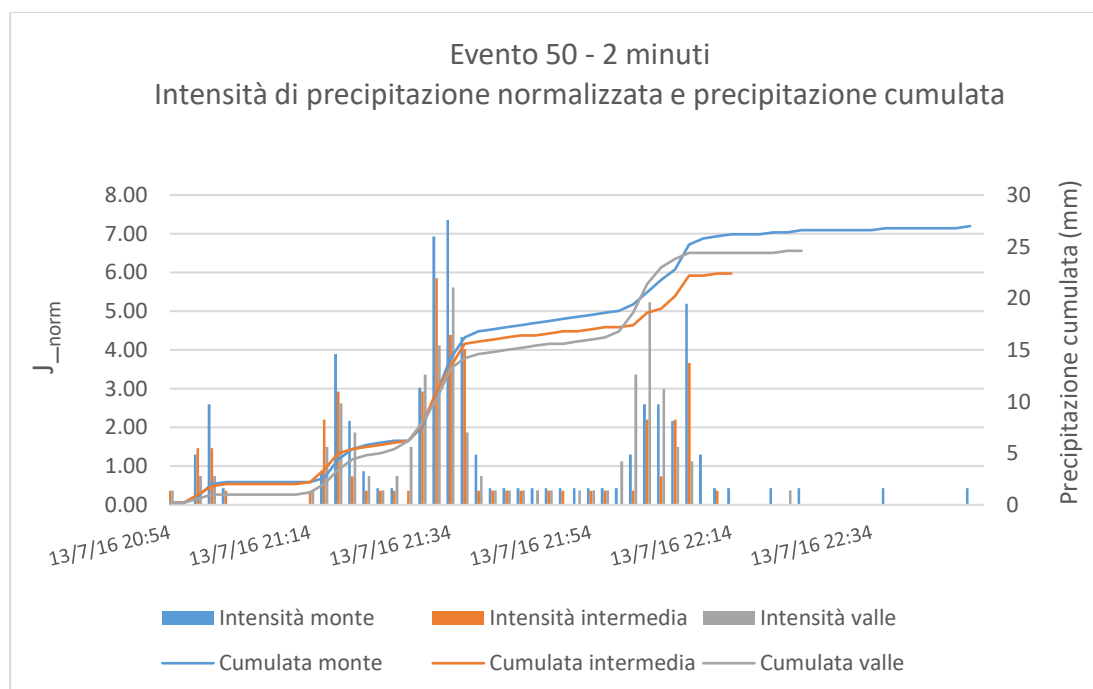


Grafico 5.10: Intensità di precipitazione e cumulata dell'evento 50.

In *Tabella 5.7* e nel *Grafico 5.10* sono riportati i parametri dell'evento 50. Quest'evento, particolarmente intenso, si è verificato il 23 luglio 2016 fra le ore 20:55 e le ore 22:50 per una durata di 1 ora e 55 minuti.

I valori massimi di intensità registrati sono ragguardevoli in tutti e tre i pluviometri e variano fra 102,0 mm/h al pluviometro di monte e 90,0 mm/h al pluviometro di valle.

L'altezza di pioggia precipitata durante l'evento è compresa fra i 27 mm di monte e i 22,4 mm di valle.

Lo scarto quadratico medio $s(J)$ mostra valori elevati in accordo con la presenza di intensità molto al di sopra dei valori medi.

Il momento del primo ordine del tempo rispetto all'altezza di precipitazione, $m(t)$, si colloca all'incirca a metà dell'evento. Lo scarto quadratico medio $s(t)$, presenta valori contenuti, dell'ordine dei 20 minuti.

Il momento del terzo ordine, $m_3(t)$, presenta valori più bassi rispetto agli eventi precedenti ad indicare una distribuzione della precipitazione nel tempo più simmetrica rispetto al valore medio $m(t)$. I suoi valori sono positivi nei pluviometri intermedio e di monte e negativo al pluviometro di valle.

Questo evento ha causato dei fenomeni di scorrimento superficiale e trasporto solido all'interno del canale che saranno trattati più approfonditamente più avanti.

Evento 51

Evento 51 - 2 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	21/7/16 20:10	21/7/16 20:11	21/7/16 20:13
Ora fine	21/7/16 21:00	21/7/16 20:59	21/7/16 21:07
h_{tot} (mm)	18.40	13.60	6.80
J_{max} (mm/h)	174.00	162.00	60.00
$m(J)$ (mm/h)	21.00	16.32	7.29
$s(J)$ (mm/h)	40.29	32.67	12.25
$m_3(J)$ (mm/h) ³	182063.08	124813.63	5575.07
$m(t)$	21/7/16 20:27	21/7/16 20:26	21/7/16 20:30
$s(t)$ (h)	0.129	0.127	0.166
$m_3(t)$ (h ³)	0.002268	0.002326	0.007384
Trasporto solido	NO		
Trasporto liquido	NO		
Assenza di trasporto	SI		

Tabella 5.8: Parametri dell'evento 51.

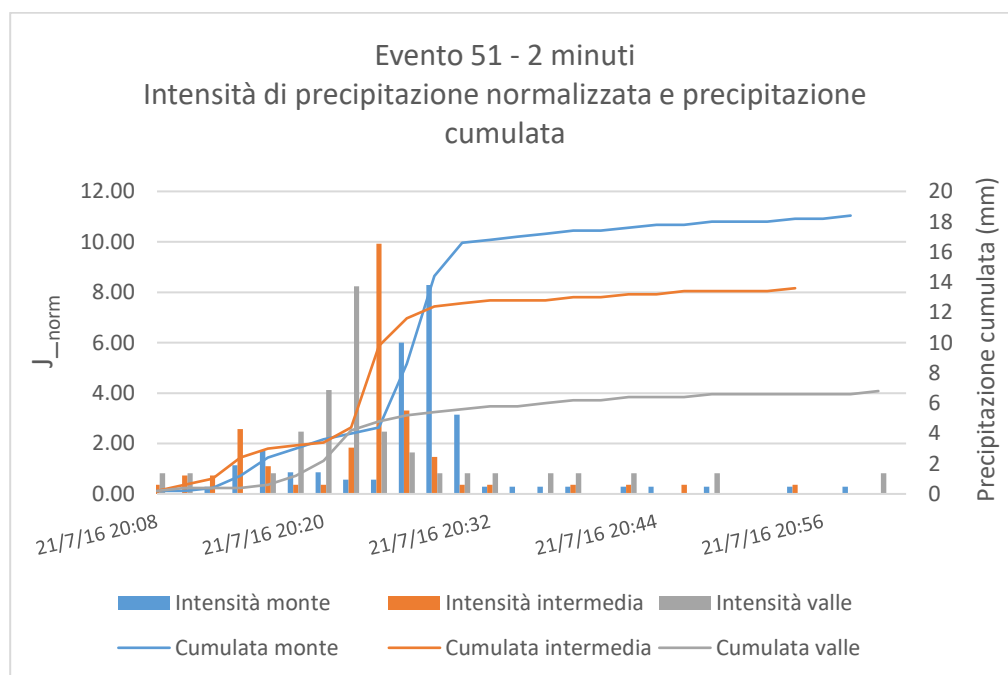


Grafico 5.11: Intensità di precipitazione e cumulata dell'evento 51.

L'evento 51, descritto dal *Grafico 5.11* e dalla *Tabella 5.8*, ha avuto luogo il 21 luglio 2016 fra le 20:10 e le 21:07 per una durata totale di 57 minuti.

Si è trattato di un evento breve e molto locale: basti pensare che l'intensità massima registrata a monte, 174,0 mm/h, è quasi tre volte maggiore a quella registrata a valle di 60,0 mm/h.

I valori dello scarto quadratico medio $s(J)$ e del momento del terzo ordine $m_3(J)$ mostrano un'ingente differenza fra di loro: a monte $s(J)$ e $m_3(J)$ sono molto grandi, indicando la presenza di valori dell'intensità estremi, mentre a valle i valori sono più contenuti.

Il momento del primo ordine del tempo rispetto all'altezza di precipitazione $m(t)$ si trova nella prima metà dell'evento, indicando, come è possibile osservare dal *Grafico 5.11*, che l'altezza di precipitazione, e di conseguenza l'intensità, è concentrata maggiormente verso l'inizio dell'evento. Lo scarto quadratico medio $s(t)$ presenta valori piuttosto bassi e simili fra loro, stando a indicare che le altezze di precipitazione e le intensità sono concentrate prevalentemente attorno al valore di $m(t)$. Il momento del terzo ordine $m_3(t)$ ha anch'esso valori piuttosto bassi e positivi, stando ad indicare uno sbilanciamento verso destra delle altezze di precipitazione.

Dal *Grafico 5.11* si vede molto bene che il fenomeno inizia subito con un'intensità crescente in maniera estrema, soprattutto a monte, per poi esaurirsi molto velocemente con delle intensità molto basse.

Questo evento, nonostante la sua estrema intensità non ha generato fenomeni di trasporto osservabili all'interno del canale.

Evento 62

Evento 62 - 2 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	14/8/16 20:56	14/8/16 20:59	14/8/16 21:33
Ora fine	14/8/16 21:14	14/8/16 21:07	14/8/16 21:39
h_{tot} (mm)	19.60	3.40	0.40
J_{max} (mm/h)	144.00	42.00	6.00
$m(J)$ (mm/h)	58.20	20.40	3.00
$s(J)$ (mm/h)	57.93	15.46	3.00
$m_3(J)$ (mm/h) ³	39574.66	-93.31	0.00
$m(t)$	14/8/16 21:00	14/8/16 21:03	14/8/16 21:37
$s(t)$ (h)	0.053	0.029	0.033
$m_3(t)$ (h ³)	0.000082	-0.000010	0.000000
Trasporto solido	NO		
Trasporto liquido	NO		
Assenza di trasporto	SI		

Tabella 5.9: Parametri dell'evento 62.

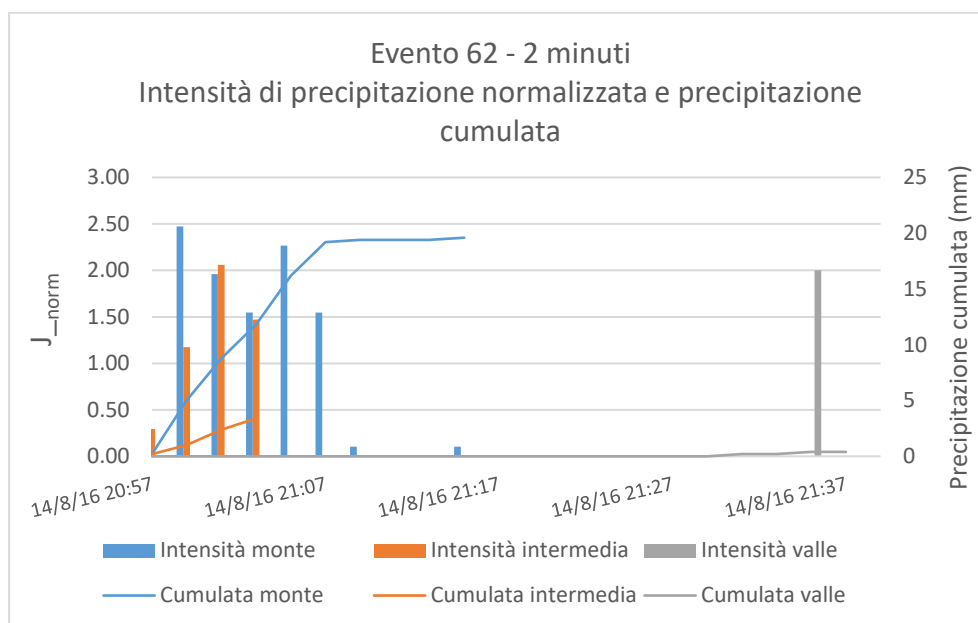


Grafico 5.12: Intensità di precipitazione e cumulata dell'evento 62.

L'evento 62 si è verificato fra le ore 20:56 e le ore 21:39 del 14 agosto 2016. Si è trattato di un evento estremamente breve e intenso avvenuto in concomitanza con un evento di colata nel canale adiacente a quello in studio.

Osservando la *Tabella 5.9* e il *Grafico 5.12* si nota subito che l'evento ha avuto luogo prevalentemente nella parte di monte: se l'intensità massima registrata dal pluviometro di monte è pari a 144,0 mm/h, a valle il valore massimo registrato è di 6,0 mm/h. Lo stesso vale per l'altezza di precipitazione caduta al suolo: 19,6 mm a monte contro 0,4 mm a valle.

Il comportamento che si osserva a monte è di una precipitazione che parte subito con un'intensità altissima, mantiene una certa intensità per circa dieci minuti, e si esaurisce in maniera molto rapida.

I valori dello scarto quadratico medio $s(J)$ e del momento del terzo ordine $m_3(J)$ esprimono bene la grande variabilità delle intensità all'interno del fenomeno.

Il momento del primo ordine del tempo rispetto all'altezza di precipitazione, $m(t)$, si colloca, prevedibilmente nella prima parte dell'evento in concomitanza delle intensità maggiori. Lo scarto quadratico medio $s(t)$ presenta valori molto bassi, soprattutto a causa della limitata estensione temporale dell'evento. Il momento del terzo ordine $m_3(t)$ ha anch'esso valori molto bassi, ma positivi per quanto riguarda il pluviometro di monte, stando ad indicare uno sbilanciamento delle altezze di precipitazione verso destra.

In Allegato 5 e Allegato 6 sono riportati i dati ed i grafici, su base temporale di dieci minuti, di tutti gli eventi con intensità massima superiore a 20 mm/h.

Confronto fra gli eventi precedentemente analizzati

Per effettuare un confronto fra i comportamenti dei diversi eventi precedentemente analizzati, si è deciso di creare il *Grafico 5.13* in cui vengono messe a confronto le distribuzioni delle intensità degli eventi in maniera adimensionale.

Per fare ciò sull'asse delle ascisse è riportato il tempo normalizzato alla durata del singolo evento così definito:

$$t_{norm} = \frac{t_i - t_0}{t_f - t_0}$$

Dove t_i è il tempo del singolo intervallo considerato, t_0 il tempo a cui inizia l'evento e t_f il tempo finale dell'evento. In ordinata è riportata l'intensità normalizzata J_{norm} usata anche nella descrizione dei singoli eventi.

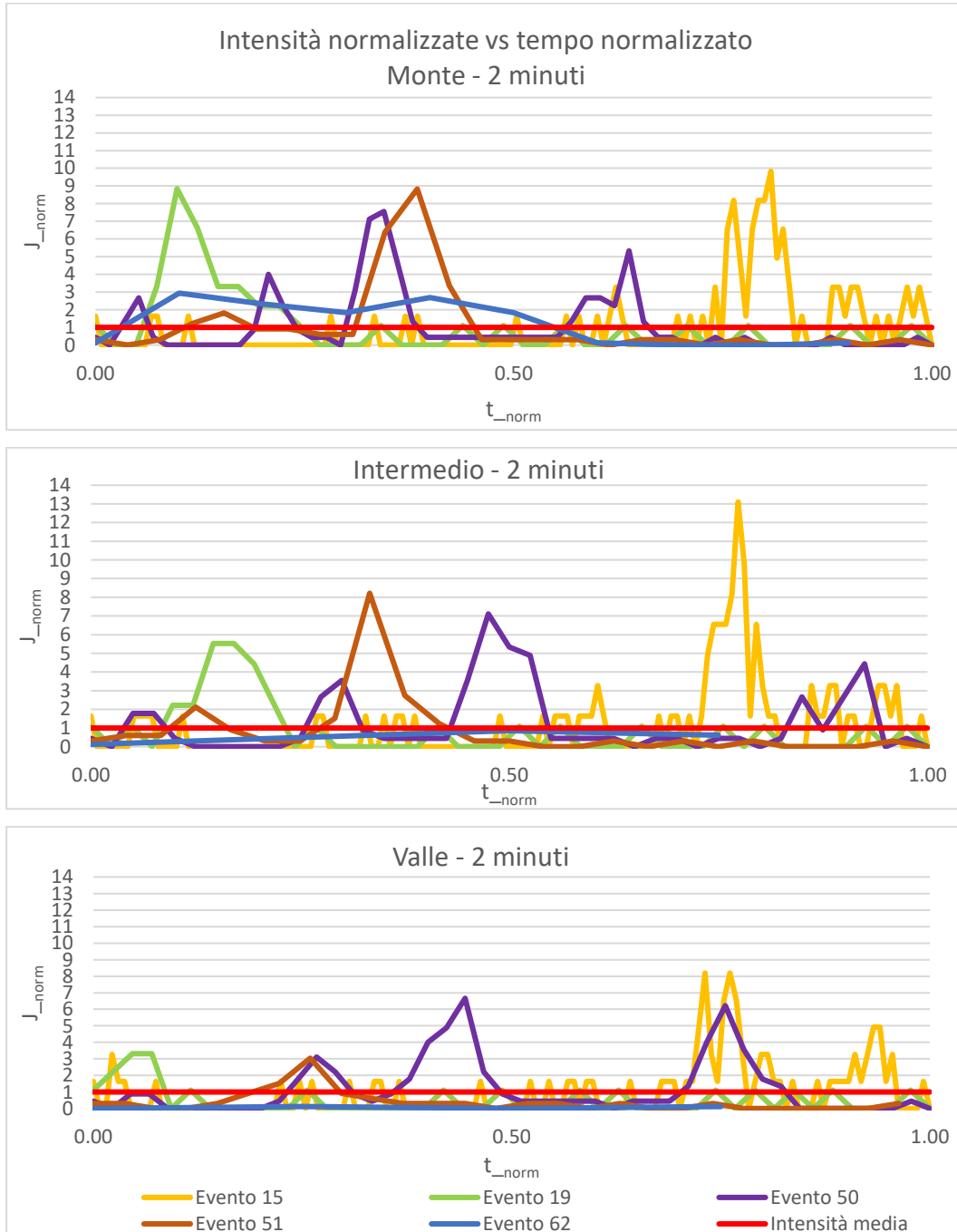


Grafico 5.13: Confronto adimensionale fra le distribuzioni di intensità dei vari eventi.

Questo genere di rappresentazione ha il vantaggio di essere adimensionale e permette quindi di confrontare il comportamento di vari eventi con intensità e durata diversi fra loro.

Ciò che si può notare osservando il *Grafico 5.13*, è che quasi sempre gli eventi presentano uno o più picchi di intensità concentrati in archi temporali molto brevi all'interno di intervalli più ampi caratterizzati da intensità minori. In alcuni casi le intensità massime sono maggiori anche di un ordine di grandezza rispetto all'intensità media dell'evento.

Questi picchi di intensità non hanno una collocazione sempre uguale all'interno dell'evento.

L'evento 15, ad esempio ha un doppio picco molto intenso collocato alla fine, mentre l'evento 19 presenta un picco all'inizio. L'evento 50 è caratterizzato da tre picchi di intensità: uno maggiore, collocato poco prima della metà dell'evento, preceduto e seguito da due picchi di intensità inferiore. L'evento 51 ha invece un unico picco in una posizione all'incirca centrale, mentre l'evento 62 presenta un valore di intensità che, a monte, si mantiene elevato, arrivando per due volte a raggiungere il triplo dell'intensità media, per tutta la prima metà dell'evento.

Si è, quindi, cercato di individuare uno ietogramma che potesse descrivere gli eventi avvenuti all'interno del sito del Rio Acquabona. Ciò non è stato facile a causa della grande variabilità di comportamento delle precipitazioni che si è potuta rilevare dall'osservazione dei singoli eventi.

Sono stati presi in considerazione diversi ietogrammi sintetici (ietogramma rettangolare; ietogramma triangolare; ietogramma sifalda; Ietogramma Desbordes; Ietogramma Chicago) che vengono descritti nel seguito.

Ietogramma rettangolare

Questo ietogramma (vedi *Figura 5.2*) presenta le seguenti caratteristiche:

- Durata δ ,
- Intensità costante $m(J)$.

Le principali problematiche legate allo ietogramma triangolare sono il fatto che viene considerata solo la parte critica della precipitazione che si verifica

nell'intervallo δ , ignorando parte dell'altezza complessiva della pioggia, e il fatto che si trascura completamente l'effetto dei picchi di intensità, mediando la pioggia sulla durata δ [5].

Tenendo conto di questi fattori, questo ietogramma è poco idoneo per descrivere le precipitazioni che si osservano nell'area di studio, le quali spesso presentano dei forti picchi di intensità.

Ietogramma triangolare

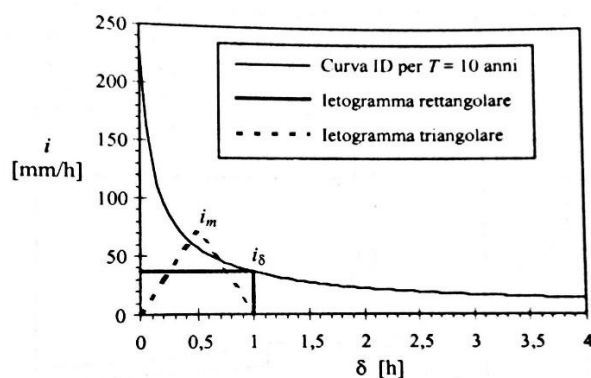
Lo ietogramma triangolare (vedi *Figura 5.2*) è stato concepito per introdurre l'effetto di picco, trascurato dallo ietogramma rettangolare. Le sue caratteristiche sono:

- Durata complessiva δ ;
- Intensità media $m(J)$;
- Intensità di punta $J_{\max}=2 m(J)$;
- Durata del ramo ascendente t_1 data da:

$$t_1 = 3 \frac{\mu_0}{h_{\text{tot}}} - 2\delta$$

Dove μ_0 è il momento di primo ordine dello ietogramma rispetto all'istante iniziale e h_{tot} l'altezza totale dello ietogramma [5].

Anche lo ietogramma triangolare sottostima l'altezza complessiva dell'evento, quindi non è stato ritenuto idoneo a descrivere gli eventi analizzati.



Ietogrammi rettangolare e triangolare (centrato) della durata di un'ora con tempo di ritorno $T = 10$ anni a Moie.

Figura 5.2: Esempio di ietogramma rettangolare e triangolare (tratto da: ARTINA S. et alii, Sistemi di Fognatura – Manuale di Progettazione, Hoepli, 2001).

Ietogramma Sifalda

Questo tipo di ietogramma (vedi *Figura 5.3*) è costituito da una parte critica, rappresentata dallo ietogramma rettangolare di durata δ , a cui è sono aggiunte una parte iniziale e finale per tenere conto della frazione dello ietogramma che non contribuisce all'altezza critica. Le caratteristiche dello ietogramma Sifalda sono:

parte critica:

- durata δ ,
- intensità costante J_δ .

Ietogramma complessivo:

- durata $\tau_c=4 \delta$,
- intensità media $m(J)= J_\delta/2,225$.

Parte iniziale:

- durata δ ,
- intensità crescente linearmente da $0,15 m(J)$ a $m(J)$.

Parte finale:

- durata 2δ ,
- intensità decrescente linearmente da $m(J)$ a $0,2 m(J)$.

Lo ietogramma Sifalda, come quello rettangolare sottostima l'effetto di picco [5].

Questo ietogramma si presterebbe già meglio a descrivere i fenomeni osservati nell'area del Rio Acquabona in quanto tiene conto anche della componente dell'evento a bassa intensità, tuttavia il fatto che l'effetto di picco venga sottostimato gli fa preferire altri tipi di ietogramma.

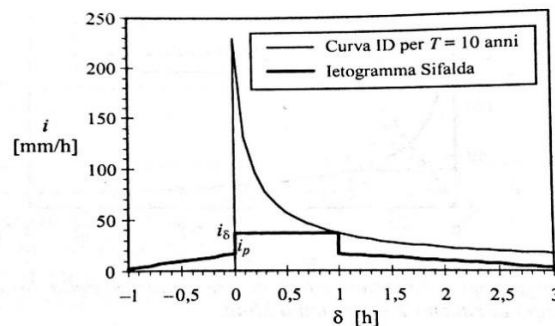


Figura 5.3: *Esempio di ietogramma Sifalda (tratto da: ARTINA S. et alii, Sistemi di Fognatura – Manuale di Progettazione, Hoepli, 2001).*

Ietogramma Desbordes

Questo tipo di ietogramma (vedi *Figura 5.4*) è composto da due componenti, le cui caratteristiche sono:

pioggia complessiva:

- durata τ_c ,
- altezza totale della pioggia h_{tot} ,

parte iniziale:

- durata $\tau_1 = \theta (\tau_c - \delta)$, con θ che varia fra 0 e 1.
- Intensità crescente linearmente da 0 a J_b , dove:

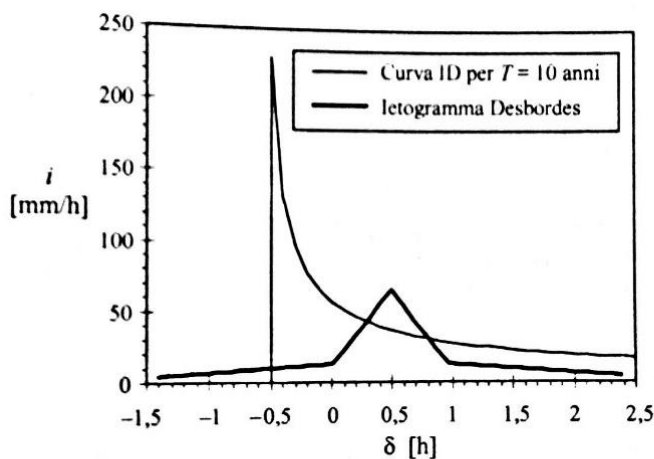
$$J_b = 2 \frac{h_{tot} - h_\delta}{\tau_c - \delta}$$

Componente intensa:

- durata δ ,
- intensità media J_δ ,
- intensità crescente linearmente da J_b fino a $J_{max} = 2 J_\delta - J_b$ al tempo $\tau_1 + \delta / 2$ e poi decrescente linearmente fino a J_b al tempo $\tau_1 + \delta$.

Parte finale:

- durata $(1 - \theta) (\tau_c - \delta)$,
- intensità decrescente linearmente da J_b a 0 [5].



Ietogramma Desbordes simmetrico ($\theta = 0,5$) della durata critica di un'ora con tempo di ritorno $T = 10$ anni a Moie.

Figura 5.4: Esempio di ietogramma Desbordes (tratto da: ARTINA S. et alii, *Sistemi di Fognatura – Manuale di Progettazione*, Hoepli, 2001).

Questo ietogramma è in grado di descrivere in maniera soddisfacente gli eventi che sono avvenuti all'interno dell'area di studio durante il periodo di monitoraggio, in quanto tiene conto della presenza di un picco di intensità all'interno di un evento con valori di intensità più bassi. Variando il valore del parametro θ fra 0 e 1 è inoltre possibile descrivere diverse posizioni del picco all'interno dell'evento.

Ietogramma Chicago

Lo ietogramma Chicago è uno ietogramma sintetico in cui la distribuzione temporale delle altezze coincide con la relazione altezza-durata e intensità-durata. Queste relazioni manifestano un andamento caratteristico: considerando un intervallo di tempo attorno al picco di precipitazione, l'altezza di precipitazione cresce meno che proporzionalmente all'aumentare dell'intervallo, mentre l'intensità tende ad un valore finito elevato quando l'intervallo tende a zero e a un valore piccolo, ma non nullo, quando l'intervallo è molto lungo.

Lo ietogramma Chicago è dato, in termini di altezza e intensità da:

$$h(t) = \frac{at}{(b+t)^m} = J_{\max} \left(\frac{b}{b+t} \right)^m t$$

$$J(t) = \frac{dh(t)}{dt} = a \frac{b + (1-m)t}{(b+t)^{m+1}} = J_{\max} b^m \frac{b + (1-m)t}{(b+t)^{m+1}}$$

In cui a e b sono coefficienti positivi ed m è un esponente compreso fra 0 e 1.

Nella sua forma generale, lo ietogramma Chicago ha il picco a un generico tempo t_r minore della durata complessiva dell'evento t_c . Si ponga:

$$r = \frac{t_r}{t_c}$$

Sostituendo nella seconda equazione (quella dell'intensità) al posto di t :

- per $t \leq t_r$: $\frac{t_r - t}{r}$

si ha:

$$J(t) = a \frac{b + (1-m) \frac{t_r - t}{r}}{\left(b + \frac{t_r - t}{r} \right)^{m+1}}$$

$$h(t) = a \left[t_r \left(b + \frac{t_r}{r} \right)^{-m} - (t_r - t) \left(b + \frac{t_r - t}{r} \right)^{-m} \right]$$

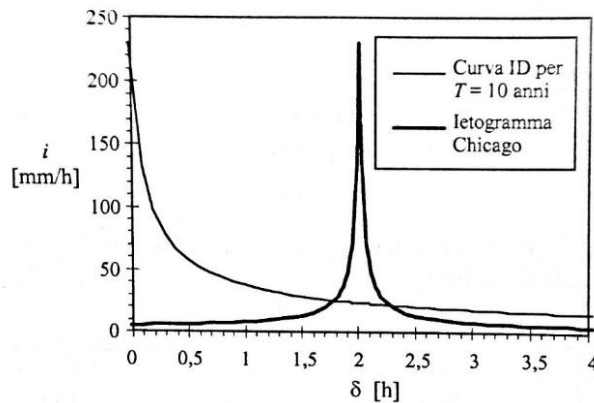
- per $t \geq t_r$: $\frac{t_r - t}{r}$

si ha:

$$J(t) = a \frac{b + (1 - m) \frac{t - t_r}{1 - r}}{\left(b + \frac{t_r - t}{1 - r} \right)^{m+1}}$$

$$h(t) = a \left[t_r \left(b + \frac{t_r}{r} \right)^{-m} - (t_r - t) \left(b + \frac{t - t_r}{1 - r} \right)^{-m} \right]$$

Il parametro r dà un'indicazione sulla posizione del picco all'interno dell'evento di precipitazione: per $r = 0$ vale solo il secondo ramo (il picco si trova all'inizio dell'evento) e lo ietogramma si dice anticipato. Per $r = 0,5$ il picco è centrato esattamente a metà dell'evento e lo ietogramma si dice centrato. Per $r = 1$ vale solo il primo ramo (il picco si trova alla fine dell'evento) e lo ietogramma si dice ritardato [5]. In *Figura 5.5* si può vedere un esempio di ietogramma Chicago centrato.



Ietogramma Chicago centrato ($r = 0,5$) con tempo di ritorno $T = 10$ anni a Moie.

Figura 5.5: Esempio di ietogramma Chicago centrato (tratto da: ARTINA S. et alii, Sistemi di Fognatura – Manuale di Progettazione, Hoepli, 2001).

Fra gli eventi precedentemente analizzati il numero 19 e il numero 51 sono ben descritti da uno ietogramma Chicago anticipato, il numero 50 da uno ietogramma Chicago centrale e il numero 15 da uno ietogramma Chicago ritardato.

5.2 Eventi con trasporto solido

In questo paragrafo vengono trattati, in ordine cronologico, gli eventi con trasporto solido avvenuti durante il periodo di studio all'interno del sito di monitoraggio del Rio Acquabona e nel canale adiacente in sinistra orografica.

Per analizzare gli eventi avvenuti all'interno del canale del Rio Acquabona si è fatto ricorso alle immagini acquisite dalla telecamera della stazione di valle con un tasso di acquisizione di 0,625 frames/secondo, corrispondenti ad un fotogramma ogni 1,6 secondi. Con tali immagini sono stati poi realizzati dei filmati che hanno permesso di valutare il comportamento dei fenomeni di trasporto avvenuti nel canale in corrispondenza della stazione di valle e di fare delle correlazioni con le precipitazioni registrate dai tre pluviometri.

Riguardo ai fenomeni avvenuti nel canale adiacente invece non sono disponibili immagini, quindi l'analisi è limitata allo studio delle precipitazioni registrate dai pluviometri in corrispondenza dei principali eventi di massa avvenuti.

Evento del 20 maggio 2016

Il 20 maggio 2016, poco dopo le ore 11.30 si è verificato il crollo di una grossa porzione di roccia dalla Punta Nera, un'antecima del Sorapis posta proprio sopra la frazione di Acquabona. Il materiale distaccatosi è andato a schiantarsi con grande fragore nel canale in sinistra orografica a quello in studio, in cui nell'estate del 2015 avevano avuto luogo le colate detritiche che hanno interessato la Statale 51 Alemagna, fermandosi a monte della strada (Fonte: Corriere delle Alpi).

Nel *Grafico 5.14* sono riportate le intensità di precipitazione e la cumulata registrate dai pluviometri nei cinque giorni precedenti il crollo. Ciò che si nota è che vi è un unico evento di precipitazione (precedentemente catalogato come evento numero 10) il 19 maggio. Tale evento presenta intensità molto basse, inferiori ai 5 mm/h per una base temporale di dieci minuti, e un'altezza d'acqua caduta al suolo di circa 8 mm.

Vista la scarsità delle precipitazioni durante l'evento e nel periodo precedente, si può affermare che con buona probabilità il crollo non sia stato innescato da eventi di precipitazione.

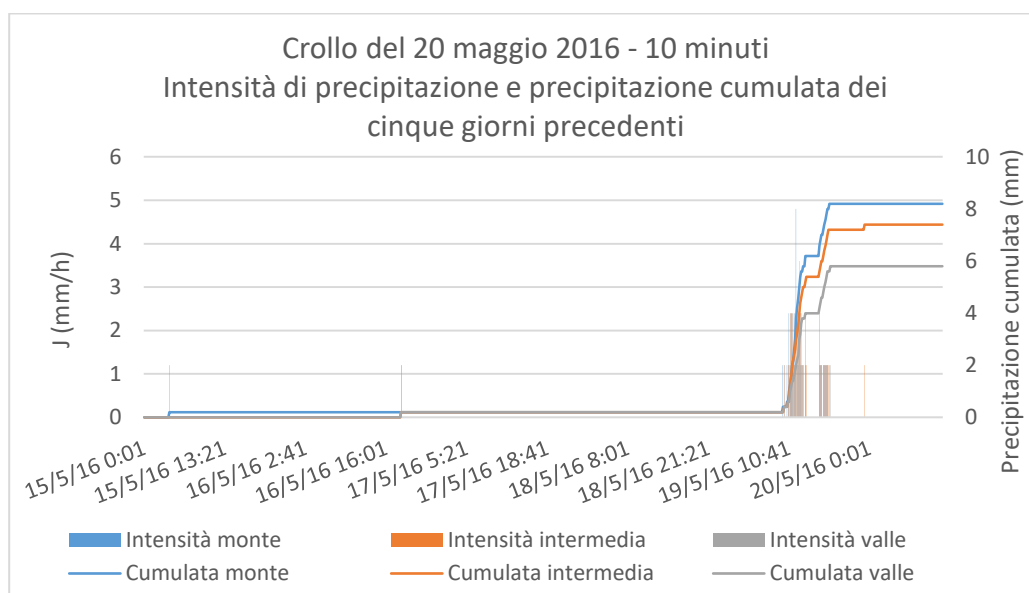


Grafico 5.14: Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per i cinque giorni precedenti l'evento di crollo del 20 maggio 2016.

Evento del 15 giugno 2016

Attorno alle 4 del mattino del 15 giugno 2016, una colata di detrito con un fronte di oltre 80 metri e uno spessore di 2 metri proveniente dal canale adiacente a quello in studio ha invaso la Statale 51 Alemagna (*Figura 5.6*) bloccando il traffico fino alle 16 (Fonte: Il Gazzettino, 15 giugno 2016).



Figura 5.6: La colata di detriti del 15 giugno 2016 (Immagine Vigili del Fuoco).

Tale colata è andata a movimentare degli accumuli di materiale formati a monte della strada a seguito dell'evento di crollo del 20 maggio 2016 e che erano stati osservati durante l'uscita del 27 maggio 2016.

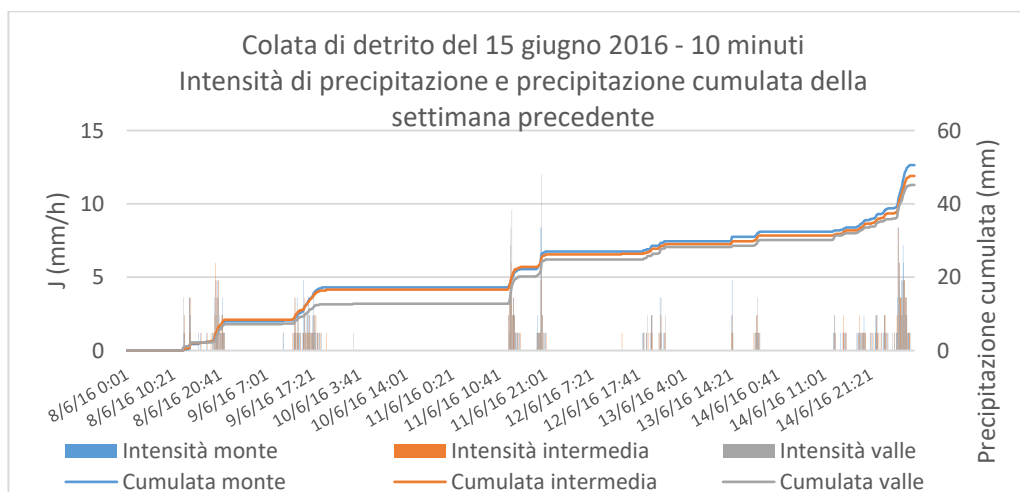


Grafico 5.15: Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per la settimana precedente l'evento di colata del 15 giugno 2016.

Come si può osservare nel *Grafico 5.15*, la settimana che ha preceduto l'evento è stata interessata da otto diversi fenomeni di precipitazione, che vanno dall'evento 22 all'evento 29, in corrispondenza del quale è avvenuta la colata. Fra questi eventi, quattro fanno parte della classe A, tre della classe B e uno, l'evento numero 26 avvenuto l'11 giugno 2016, rientra nella classe C. In ogni caso si tratta sempre di eventi con durate che non vanno oltre qualche ora.

L'altezza di precipitazione caduta durante la settimana precedente all'evento di colata varia fra 50,6 mm a monte e 45,2 mm a valle.

Di seguito verrà analizzato nel dettaglio l'evento 29, ovvero quello che ha dato origine all'evento di colata del 15 giugno 2016.

In *Tabella 5.10* e nel *Grafico 5.16* è possibile vedere i parametri e l'andamento dell'evento 29 su base temporale di due minuti.

Ciò che si può notare è la bassa intensità delle precipitazioni: la massima intensità registrata è di 12 mm/h, corrispondente ad un'altezza di precipitazione di 0,4 mm, ovvero il doppio della minima altezza registrabile dagli strumenti. Il picco di intensità si verifica verso la fine dell'evento. La durata è piuttosto estesa: 17 ore circa, e l'altezza di pioggia caduta durante l'evento varia da 17,80 mm a monte a 14,80 mm a valle.

Assumendo l'ipotesi che il comportamento delle piogge nel sito di monitoraggio sia rappresentativo anche per il comportamento delle precipitazioni nel canale adiacente, ipotesi che, vista la durata estesa dell'evento e le basse intensità medie e massime, può essere considerata ragionevole, si può affermare che l'evento del 15 giugno 2016 è stato innescato da un evento di precipitazione di scarsa intensità, ma esteso nel tempo, che probabilmente è andato a saturare il materiale, che già nella settimana precedente era stato sottoposto ad un'altezza di precipitazione dell'ordine di 50 mm.

Evento 29 - 2 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	14/6/16 13:10	14/6/16 13:15	14/6/16 13:03
Ora fine	15/6/16 6:02	15/6/16 6:01	15/6/16 6:01
h_{tot} (mm)	17.80	16.00	14.80
J_{max} (mm/h)	12.00	12.00	12.00
$m(J)$ (mm/h)	1.05	0.95	0.87
$s(J)$ (mm/h)	2.37	2.29	2.21
$m_3(J)$ (mm/h) ³	26.59	26.18	25.54
$m(t)$	15/6/16 1:44	15/6/16 1:16	15/6/16 0:41
$s(t)$ (h)	4.129	4.490	5.062
$m_3(t)$ (h ³)	-88.881888	-106.360078	-144.932584

Tabella 5.10: Parametri dell'evento 29 per un tempo di riferimento di due minuti.

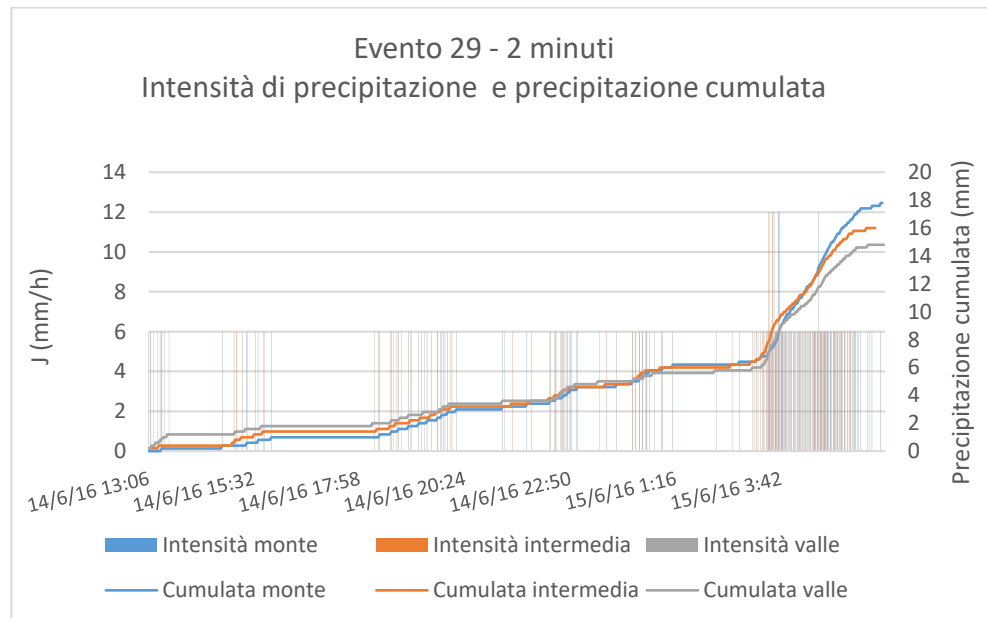


Grafico 5.16: Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di due minuti dell'evento 29.

Evento del 13 luglio 2016

La notte fra il 13 e il 14 luglio 2016, in concomitanza con l'evento di precipitazione numero 50 si è verificato un evento di massa all'interno del canale che è stato ripreso dalla telecamera della stazione di valle e ha eroso il fondo del canale di colata in destra orografica andando a creare un solco profondo una cinquantina di centimetri e largo circa due metri (vedi *Figura 5.7*).



Figura 5.7: Il canale di colata del rio Acquabona in corrispondenza della stazione di valle prima (a sinistra) e dopo (a destra) l'evento del 13 luglio 2016.

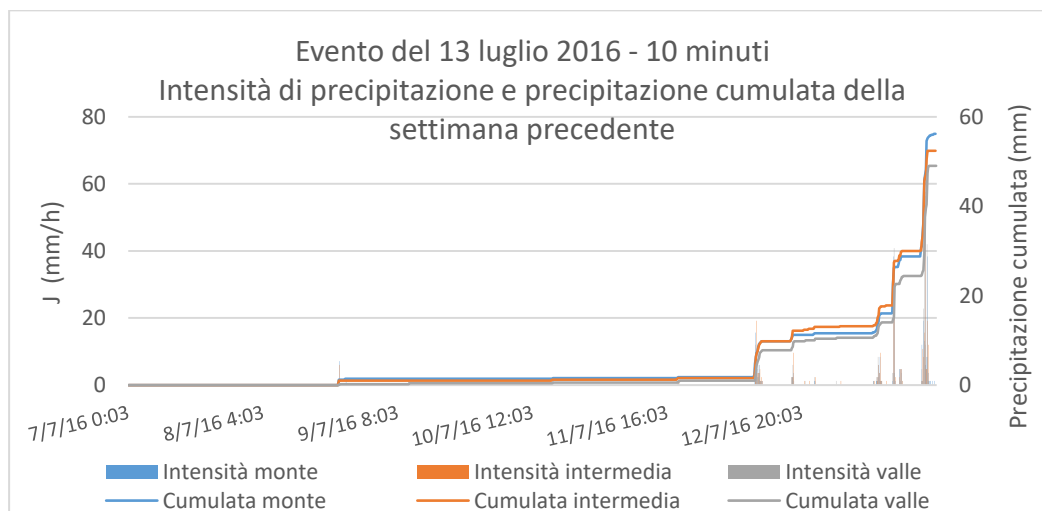


Grafico 5.17: Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per la settimana precedente l'evento del 13 luglio 2016.

Nel *Grafico 5.17* sono riportate le intensità e la precipitazione cumulata registrate nei tre pluviometri la settimana precedente all'evento. Durante tale settimana si

sono verificati cinque eventi di precipitazione: gli eventi 46 e 48 di classe B, gli eventi 47 e 49 di classe D e l'evento 50, di classe E, che ha dato origine al fenomeno di massa.

L'altezza di precipitazione caduta durante la settimana precedente all'evento varia fra 56,2 mm a monte e 49,0 mm a valle, la maggior parte dei quali concentrati negli ultimi due eventi, avvenuti entrambi il 13 luglio 2016.

L'evento piovoso che ha scatenato i fenomeni di scorrimento superficiale e trasporto di massa è l'evento numero 50. I parametri di tale evento sono già stati trattati in dettaglio nel sottocapitolo precedente, pertanto in questa sede l'evento 50 verrà analizzato in funzione dei fenomeni di massa registrati dalla telecamera.

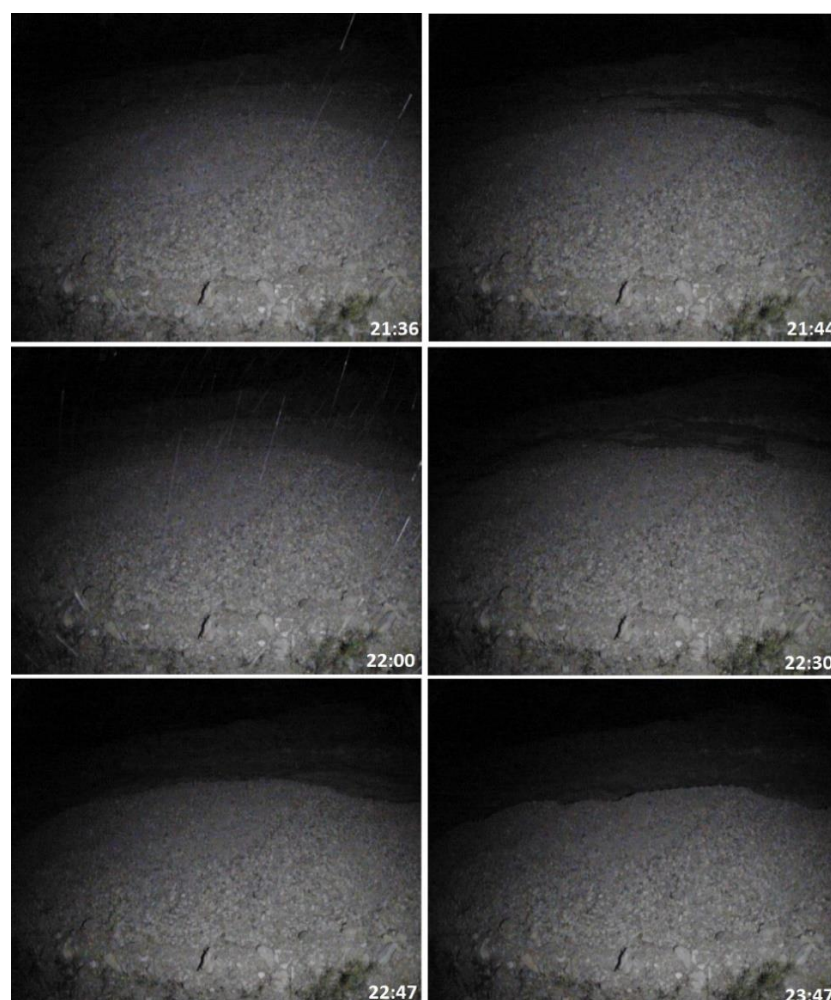


Figura 5.8: Evoluzione del canale del Rio Acquabona nelle immagini riprese dalla telecamera durante l'evento del 13 luglio 2016.

Osservando le immagini acquisite dalla telecamera della stazione di valle (vedi *Figura 5.8*) è stato possibile verificare quando sono avvenuti i fenomeni di scorrimento superficiale e di erosione all'interno del canale. Questi sono stati riportati, assieme ai valori dell'intensità di precipitazione, nel *Grafico 5*. Nonostante la scarsa visibilità determinata dal fatto che l'evento è avvenuto di notte, è stato possibile distinguere due tipi di trasporto di massa: uno più moderato (rappresentato nel *Grafico 5.18* tramite una colonna a mezza altezza) che si manifesta sotto forma di scorrimento superficiale senza causare fenomeni di erosione, e uno più intenso (rappresentato nel *Grafico 5.18* tramite una colonna a tutta altezza) che va a erodere il fondo del canale.

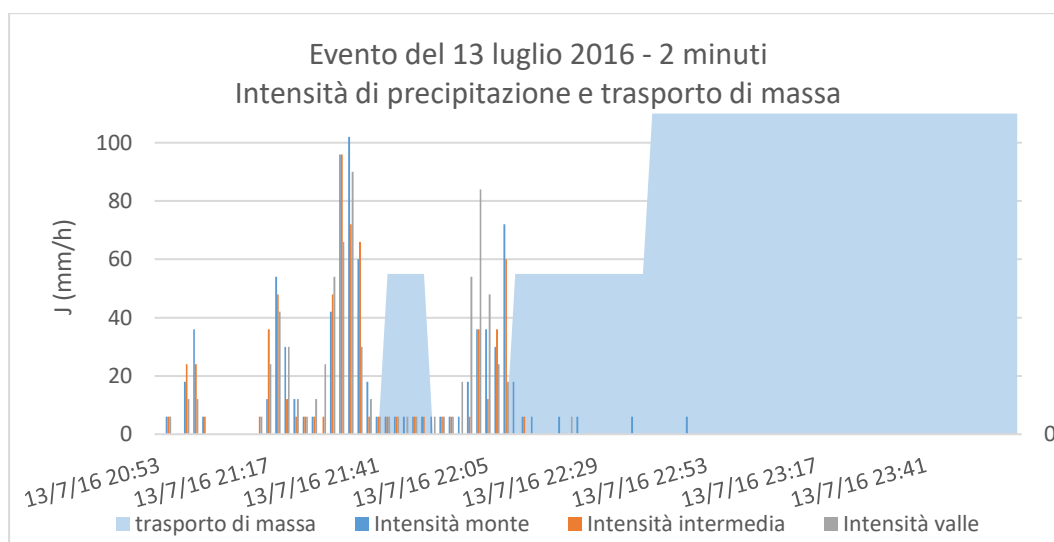


Grafico 5.18: Intensità di precipitazione e trasporto di massa dell'evento del 13 luglio 2016 su base temporale di due minuti.

Come si può osservare dal *Grafico 5.18*, fra le ore 21:17 e 21:40 del 13 luglio 2016 si verifica un evento di precipitazione che interessa tutti e tre i pluviometri e presenta valori di intensità di precipitazione compresi fra 102 mm/h a monte e 90 mm/h a valle. Al termine di questo evento si assiste ad uno scorrimento superficiale non particolarmente intenso della durata di dieci minuti che in corrispondenza della stazione di valle inizia alle ore 21:43 per esaurirsi alle 21:53.

Dalle 21:59 alle 22:09 si verifica un altro picco di precipitazione, questa volta più violento a valle, con valori di intensità che variano da 84 mm/h a valle a 60 mm/h al pluviometro intermedio.

Al termine dell'evento di precipitazione si assiste nuovamente ad un fenomeno di scorrimento superficiale che si manifesta in maniera piuttosto moderata dalle ore 22:11 fino alle ore 22:40, quando si assiste ad un impulso che arriva in maniera praticamente istantanea e rende lo scorrimento superficiale molto più intenso andando ad erodere il fondo del canale e creando un solco all'interno del quale scorre l'acqua.

Una volta creato il solco, lo scorrimento continua al suo interno e dalla posizione in cui si trova la telecamera risulta difficile capirne l'effettiva entità.

Facendo un'analisi dei rapporti fra le precipitazioni e ciò che avviene all'interno del canale è possibile riconoscere due tipi di risposta agli eventi di pioggia intensa così interpretabili:

- una prima risposta è quella alle precipitazioni che avvengono direttamente sull'alveo e che dà origine a fenomeni di scorrimento superficiale più modesti che si esauriscono velocemente, come quelli verificatisi fra le 21:43 e le 21:53 o fra le 22:11 e le 22:40.
- La seconda è quella alle precipitazioni che avvengono nella zona di alimentazione a monte e che necessitano di un certo tempo per raggiungere la sezione del canale in cui si trova la stazione di valle. Questa risposta si manifesta come uno scorrimento piuttosto intenso di acqua che arriva in maniera impulsiva per poi continuare a scorrere all'interno del canale con una certa portata ed è in grado di erodere il fondo dello stesso.

Se si considera l'impulso di scorrimento superficiale che arriva alla stazione di valle alle ore 22:40 come la risposta all'evento di precipitazione avvenuto sulla zona di alimentazione del sito fra le ore 21:16 e 21:38, è possibile dedurre che il tempo di corrivazione dalla zona di alimentazione alla stazione di valle è di circa un'ora e venticinque minuti. Tale tempo di corrivazione è coerente con quelli calcolati per gli eventi dell'anno precedente [6].

Eventi del 14 agosto 2016

Nelle ultime ore del 14 agosto 2016 si sono verificati due eventi di colata nel canale adiacente a quello in studio. Una colata ha interessato marginalmente il tratto stradale, mentre la seconda è stata di maggiore entità (vedi *Figura 5.9*). Si parla, infatti, in quest'ultimo caso di un fronte di circa 70 metri per tre metri di altezza (Fonte: Corriere delle Alpi, 15 agosto 2016).



Figura 5.9: La colata di detriti del 4 agosto 2016 che ha raggiunto la Statale Alemagna (Immagine Vigili del Fuoco).

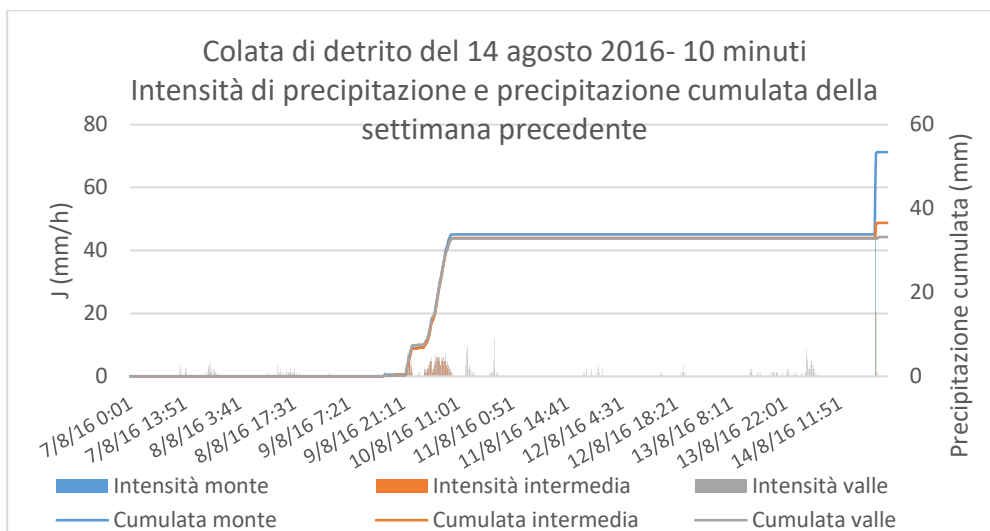


Grafico 5.19: Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per la settimana precedente l'evento di colata del 14 agosto 2016.

Nel *Grafico 5.19* è riportato l'andamento dell'intensità di precipitazione e della cumulata dell'altezza di precipitazione nella settimana precedente le colate di detrito del 14 agosto 2016. All'interno di questo arco temporale sono compresi tre eventi di precipitazione: gli eventi numero 61 e 60, di classe B, e l'evento 62, di classe E.

A differenza del periodo che ha preceduto la colata del 15 giugno 2016, in questo caso, nella settimana precedente alle colate si hanno solo tre eventi. I primi due (il numero 60 e il numero 61) presentano caratteristiche simili nei tre pluviometri e hanno un'altezza di precipitazione complessiva di poco superiore ai 30 mm, mentre l'ultimo (il numero 62), avvenuto in concomitanza con l'evento di colata, è caratterizzato da una precipitazione con un'intensità molto elevata a monte e praticamente nulla a valle concentrata in un periodo di tempo estremamente ridotto. Per l'analisi in dettaglio dell'evento 62, avvenuto in concomitanza con gli eventi di colata, si rimanda al paragrafo precedente in cui tale evento è stato trattato in maniera approfondita.

Traendo le conclusioni sugli eventi di colata del 14 agosto 2016, si può notare che, se si considerano i dati raccolti nel sito del Rio Acquabona come rappresentativi anche per il canale adiacente, tali eventi sono stati con molta probabilità innescati da un evento di precipitazione caratterizzato da altissima intensità e breve durata. Esattamente il contrario di quanto avvenuto per l'evento di colata del 14 giugno 2016. Pertanto, si può presumere che gli eventi di colata che avvengono in tale sito possono essere innescati sia da eventi con basse intensità di precipitazione distribuite su un periodo di una durata di qualche giorno, che da precipitazioni con intensità molto elevate, ma concentrate in tempi brevi.

Va comunque considerato che, vista la grande variabilità plano-altimetrica degli eventi di precipitazione (soprattutto se brevi e con alte intensità), i dati raccolti nei pluviometri dell'area in studio potrebbero non essere del tutto rappresentativi di ciò che succede nel canale adiacente, dove si sono verificati gli eventi di colata.

Evento del 17 settembre 2016

Nelle prime ore del 17 settembre 2016, in corrispondenza dell'evento di precipitazione numero 75, si è verificato un evento di massa all'interno del canale del Rio Acquabona che è stato ripreso dalla telecamera della stazione di valle.

Tale evento si è manifestato con dei fenomeni di scorrimento superficiale e trasporto di sedimenti che hanno riempito il solco formatosi durante l'evento del 13 luglio 2016 (vedi *Figura 5.10*).



Figura 5.10: Il canale di colata del rio Acquabona in corrispondenza della stazione di valle prima (a sinistra) e dopo (a destra) l'evento del 17 settembre 2016.

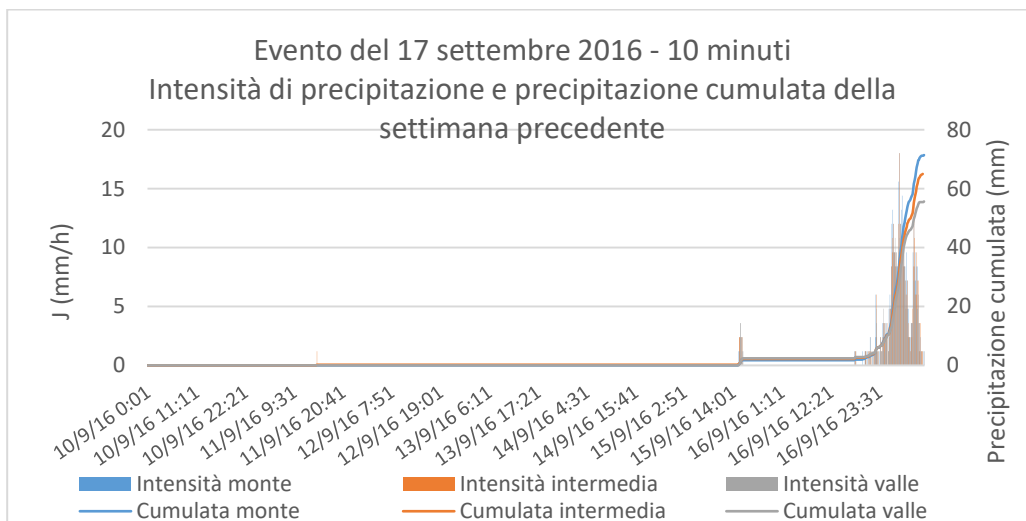


Grafico 5.20: Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per la settimana precedente l'evento del 17 settembre 2016.

Nel *Grafico 5.20* sono riportati i valori dell'intensità di precipitazione e della precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti per la settimana precedente l'evento del 17 settembre 2016. Durante tale settimana si sono verificati soltanto due eventi di precipitazione: l'evento numero 74, di classe A e l'evento 75, di classe C, in concomitanza del quale si è verificato l'evento di trasporto solido. L'altezza di precipitazione caduta durante la settimana precedente l'evento è concentrata prevalentemente durante l'evento numero 75 e varia fra 71,4 mm a monte e 55,6 mm a valle.

Si analizza ora, nel dettaglio, l'evento di precipitazione numero 75 che ha causato l'evento di trasporto solido.

Evento 75 - 2 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	16/9/16 19:50	16/9/16 20:17	16/9/16 20:15
Ora fine	17/9/16 9:16	17/9/16 9:25	17/9/16 9:37
h_{tot} (mm)	69.00	62.40	52.80
J_{max} (mm/h)	18.00	24.00	18.00
$m(J)$ (mm/h)	5.11	4.74	3.94
$s(J)$ (mm/h)	5.16	4.81	4.36
$m_3(J)$ (mm/h) ³	87.60	80.11	58.69
$m(t)$	17/9/16 4:18	17/9/16 4:19	17/9/16 4:00
$s(t)$ (h)	2.632	2.684	2.567
$m_3(t)$ (h ³)	-8.163415	-8.044140	-7.109661

Tabella 5.11: parametri dell'evento 75 su base temporale di due minuti.

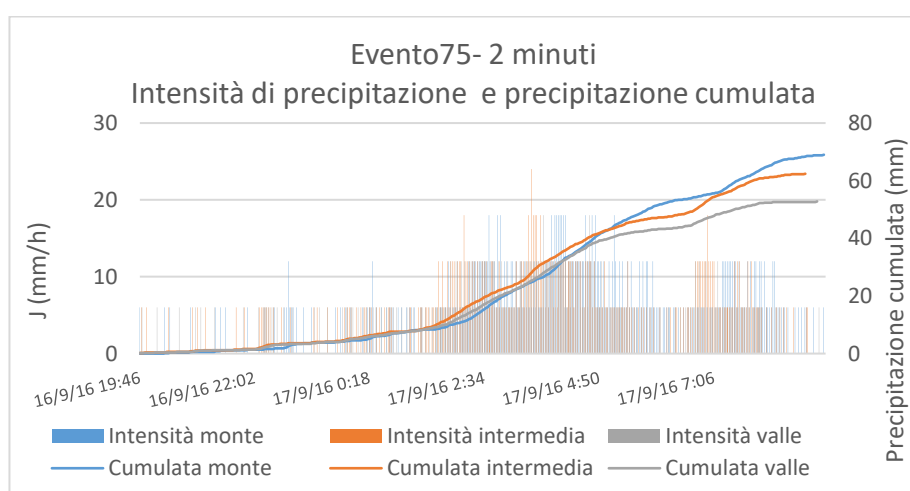


Grafico 5.21: Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata su base temporale di due minuti dell'evento 75.

In *Tabella 5.12* e nel *Grafico 5.21* sono riportati i parametri relativi all'evento 75. Tale evento si è verificato fra le 19:50 del 16 settembre 2016 e le 9:37 del 17 settembre 2016 per una durata complessiva di 13 ore e 47 minuti.

L'intensità dell'evento è piuttosto bassa: la media varia fra 5,11 mm/h a monte e 3,94 mm/h a valle, mentre i massimi sono compresi fra 24 mm/h al pluviometro intermedio e 18 mm/h a valle e a monte. L'altezza di precipitazione misurata per l'evento varia fra 69,00 mm a monte e 52,80 mm a valle.

Lo scarto quadratico medio $s(J)$ presenta valori leggermente maggiori a monte, stando a indicare che le intensità di precipitazione a monte si scostano maggiormente, seppur di poco, dalla media rispetto a quelle di valle e del pluviometro intermedio. Il momento del terzo ordine $m_3(J)$ presenta valori positivi: ciò significa che la distribuzione delle intensità è sbilanciata verso destra.

L'evento presenta una parte iniziale a bassa intensità e due picchi, di durata piuttosto estesa, ma con intensità modeste (al massimo tre volte il valore minimo misurabile dallo strumento), nella seconda metà dell'evento. Questo fatto si può notare anche dai valori del momento del primo ordine in funzione dell'altezza di precipitazione $m(t)$ che sono spostati nella seconda metà dell'evento e dai valori del momento del terzo ordine $m_3(t)$, che sono negativi, stando ad indicare uno sbilanciamento delle altezze di precipitazione verso sinistra.

Di seguito viene proposta un'analisi dell'evento 75 in funzione delle attività di scorrimento superficiale e deposizione di sedimenti avvenuti durante le prime ore del 17 settembre 2015. Osservando le immagini acquisite dalla telecamera della stazione di valle (vedi *Figura 5.11*) è stato possibile verificare quando sono avvenuti i fenomeni di scorrimento superficiale e di deposizione all'interno del canale. Questi sono stati riportati, assieme ai valori dell'intensità di precipitazione, nel *Grafico 9*. Nonostante la scarsa visibilità, determinata dal fatto che l'evento è avvenuto di notte, è stato possibile distinguere due tipi di trasporto di massa: uno più moderato (rappresentato nel *Grafico 5.22* tramite una colonna a mezza altezza) che si manifesta sotto forma di scorrimento superficiale senza causare fenomeni di deposizione, e uno più intenso (rappresentato nel *Grafico 5.22* tramite una colonna a tutta altezza) che va a movimentare del materiale e a depositarlo sul fondo del canale.

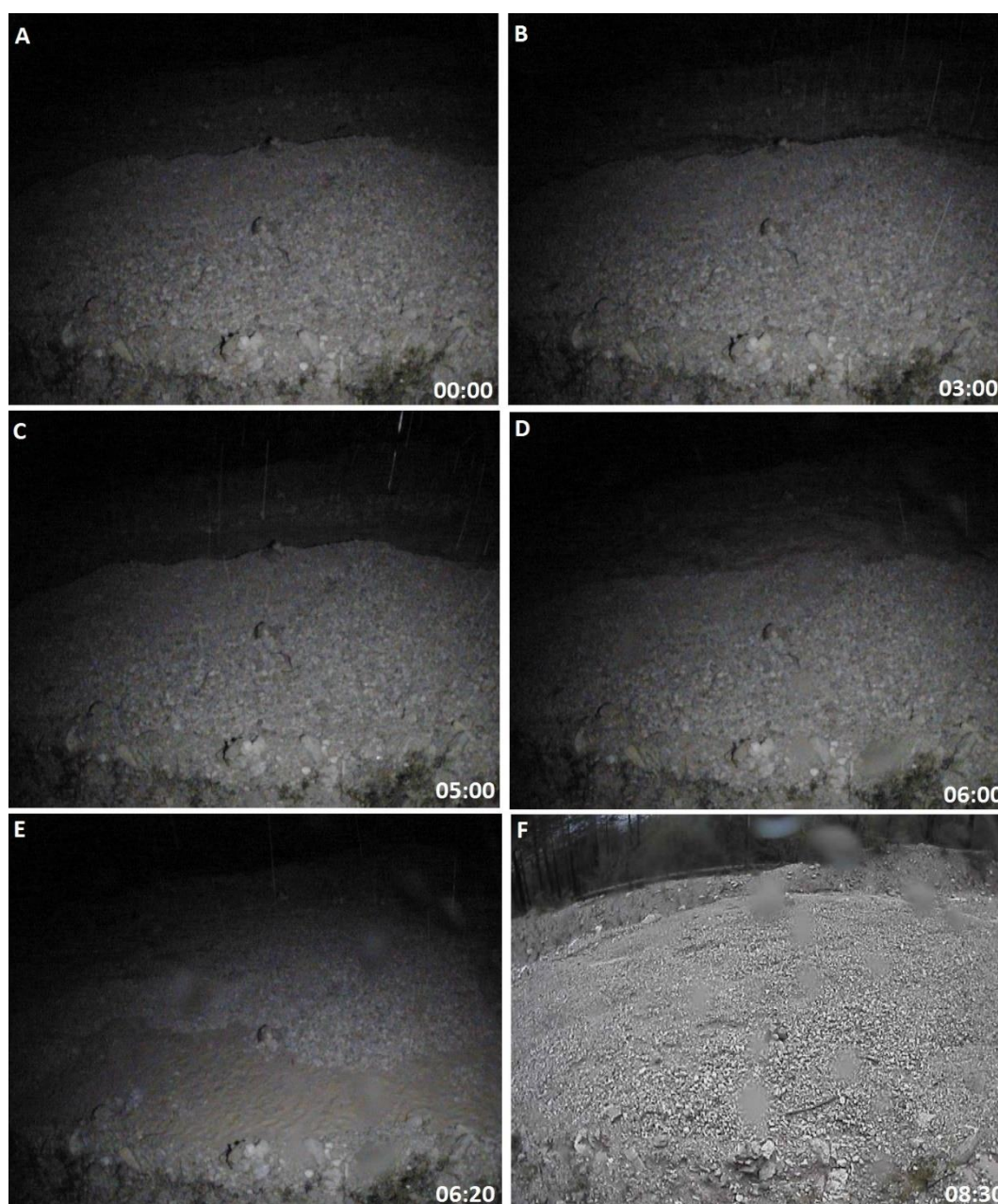


Figura 5.11: Evoluzione del canale del Rio Acquabona nelle immagini riprese dalla telecamera durante l'evento del 17 settembre 2016.

Come si può osservare nel *Grafico 5.22*, in corrispondenza della stazione di valle, l'evento di massa del 17 settembre 2016 ha inizio attorno alle ore 02:38, dopo circa sei ore e mezza dall'inizio dell'evento di precipitazione numero 75. Le precipitazioni si presentano di debole intensità, ma ben distribuite su tutto il periodo precedente l'inizio dello scorrimento superficiale, con un aumento delle intensità

che, a valle, si verifica attorno alle 02:20. Dalle immagini acquisite tramite la telecamera è possibile notare uno scorrimento superficiale che si sviluppa, senza particolare intensità, sul fondo del solco in destra orografica del canale creatosi durante l'evento del 13 luglio 2016 (vedi *Figura 5.11 B*).

Attorno alle ore 03:50, dopo circa un'ora e 35 minuti da un aumento di intensità di precipitazione registrato al pluviometro di monte, si assiste ad un incremento della portata, tanto che lo scorrimento superficiale va ad interessare tutto il solco in destra orografica del canale (vedi *Figura 5.11 C*).

Lo scorrimento prosegue all'interno del solco alternando impulsi di portata maggiori a momenti di scorrimento meno intenso trasportando materiale che va gradualmente a riempire il solco (vedi *Figura 5.11 D*).

Attorno alle ore 06:00 il solco è completamente riempito e l'acqua inizia a scorrere, alternando impulsi di scorrimento più intensi a momenti più blandi, occupando in tempi diversi varie porzioni del fondo del canale, talvolta depositando modeste quantità di sedimento (vedi *Figura 5.11 E*).

Attorno alle ore 07:40 si assiste ad una riduzione dell'attività di scorrimento che si concentra nella parte destra del canale fino ad esaurirsi definitivamente alle ore 09:08 (vedi *Figura 5.11 F*).

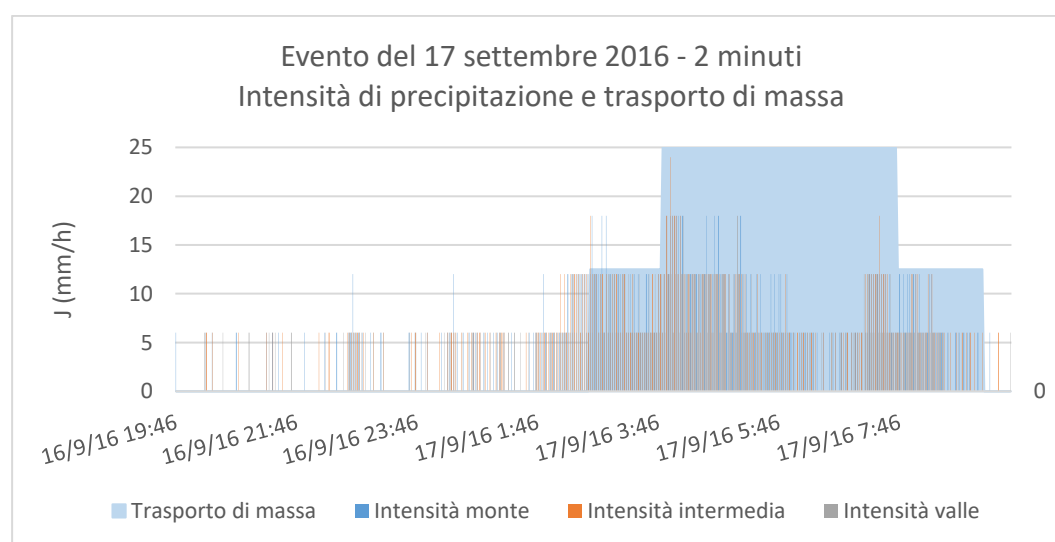


Gráfico 5.22: Intensità di precipitazione e trasporto di massa dell'evento del 17 settembre 2016 su base temporale di due minuti.

A differenza dell'evento del 13 luglio, anch'esso causa di fenomeni di trasporto di massa all'interno del canale in corrispondenza della stazione di valle e originati da un evento di precipitazione con valori di intensità elevati, l'evento del 17 settembre è stato innescato da fenomeni di precipitazione di bassa intensità, ma distribuiti in maniera continua su di un arco temporale maggiore.

Anche in questo caso, cercando di interpretare ciò che avviene all'interno del canale con i dati a disposizione, è possibile riconoscere due risposte agli aumenti dell'intensità di precipitazione in termini di movimenti di massa:

- la prima si verifica in risposta alle precipitazioni dirette sull'alveo del canale in prossimità della zona osservata e si traduce in scorrimenti superficiali di bassa portata, come avviene fra le ore 02:38 e 03:50 a seguito di un incremento dell'intensità di precipitazione avvenuto a partire dalle 02:20;
- la seconda avviene a causa delle precipitazioni che si raccolgono nella zona di ricarica a monte e fluiscono all'interno del canale fino a valle, dando luogo ad un aumento della portata dello scorrimento superficiale. Ciò è avvenuto fra le ore 03:50 e le ore 07:40 in risposta dell'aumento di intensità registrato dal pluviometro di monte fra le ore 02:16 e 05:54. In tal caso è possibile dedurre che il tempo di corrivazione dalla zona di ricarica a monte alla stazione di valle è di circa 1 ora e 35 minuti, tempo confrontabile con quelli rilevati nel 2015 [6].

5.3 Confronto fra le precipitazioni del 2015 e del 2016

All'interno di questo paragrafo verrà effettuato un confronto fra le precipitazioni avvenute durante il 2016 e l'anno precedente.

Il periodo di monitoraggio, nel 2015 è stato limitato all'arco temporale compreso fra il 16 luglio 2015 e il 16 ottobre 2015 per il pluviometro di monte e fra il 16 luglio 2015 e il 29 ottobre per il pluviometro di valle, mentre nel 2016 i dati sono stati raccolti dal 20 aprile 2016 al 12 ottobre 2016.

Per fare questo confronto si è deciso di fare riferimento alle basi temporali di dieci minuti ed un'ora, in quanto permettono agevolmente di individuare i singoli eventi ad alta intensità anche su tempi estesi, come i periodi di monitoraggio in cui sono stati raccolti i dati. Per poter fare delle valutazioni sulle piogge con durate maggiori e basse intensità si è invece fatto riferimento alle basi temporali di dodici ore e tre giorni.

Nel *Grafico 5.23* sono riportati i valori di intensità di precipitazione e altezza di precipitazione cumulata su base temporale di dieci minuti, un'ora, dodici ore e tre giorni ai pluviometri di monte e di valle per il 2015 e per il 2016.

Tralasciando i valori della cumulata, che essendo calcolati su durate diverse presentano ovviamente importanti differenze, si può notare che il 2016 ha registrato un numero di eventi di alta intensità nettamente superiore al 2015. Anche per le precipitazioni di durata più estesa il 2016 vede delle intensità maggiori, che presentano valori massimi, come si poteva facilmente prevedere, nel periodo fra settembre e ottobre.

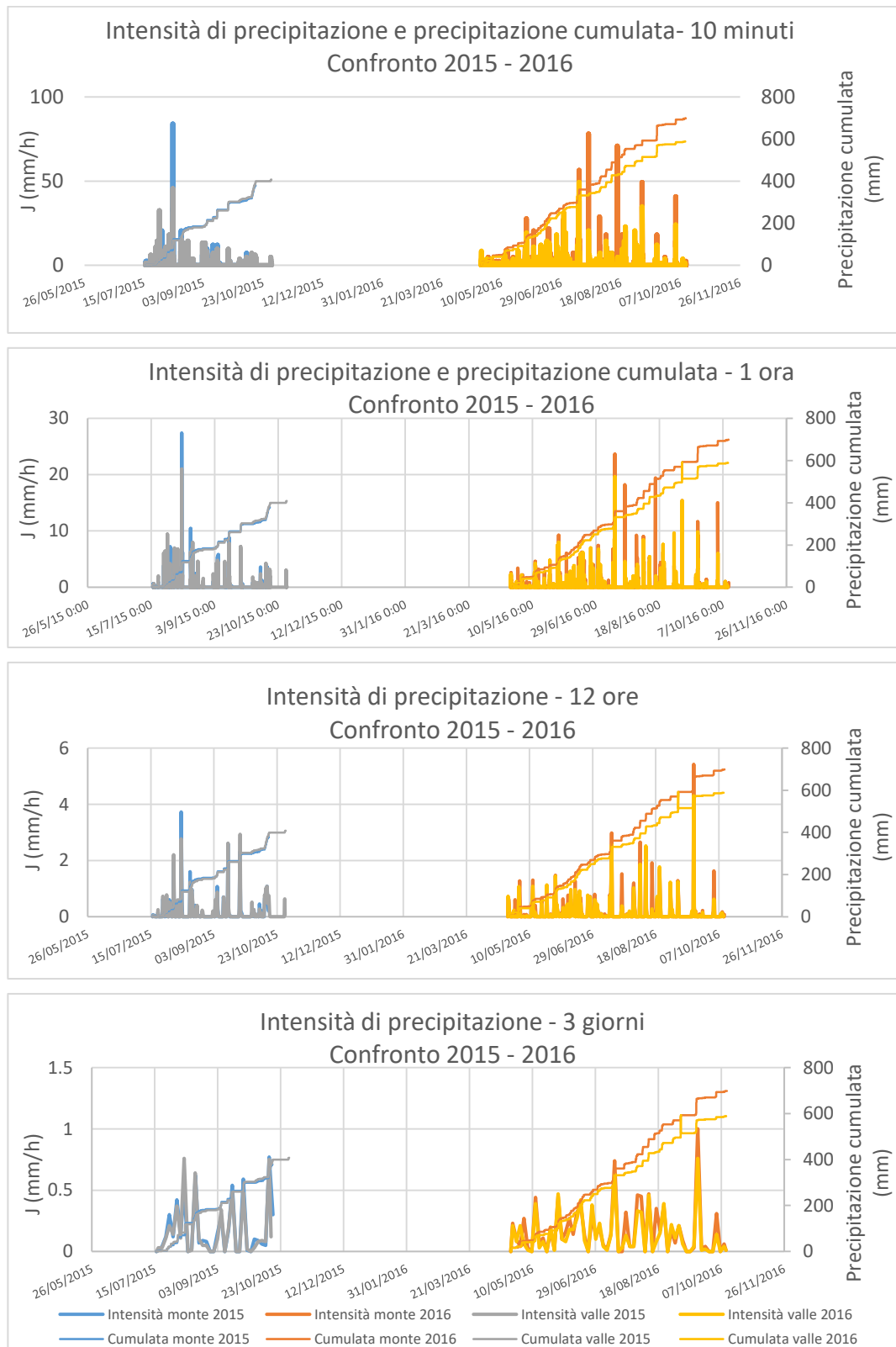


Grafico 5.23: Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata registrati dal pluviometro di monte e da quello di valle nel 2015 e nel 2016.

2015				2016			
10 minuti		1 ora		10 minuti		1 ora	
Valle	Monte	Valle	Monte	valle	Monte	valle	Monte
m(J) (mm/h)		m(J) (mm/h)		m(J) (mm/h)		m(J) (mm/h)	
2.85	2.77	1.36	1.26	2.88	3.22	1.37	1.49
CV (J)		CV (J)		CV (J)		CV (J)	
1.19	1.26	1.50	1.85	1.21	1.62	1.46	1.69
m ₃ (J) (mm/h) ³		m ₃ (J) (mm/h) ⁴		m ₃ (J) (mm/h) ⁵		m ₃ (J) (mm/h) ⁶	
212.555	263.542	10.464	8.760	218.251	1038.940	31.625	69.893
12 ore		3 giorni		12 ore		3 giorni	
Valle	Monte	Valle	Monte	Valle	Monte	Valle	Monte
m(J) (mm/h)		m(J) (mm/h)		m(J) (mm/h)		m(J) (mm/h)	
0.43	0.40	0.23	0.23	0.30	0.49	0.18	0.22
CV (J)		CV (J)		CV (J)		CV (J)	
1.33	1.56	1.02	0.95	1.27	1.23	0.96	0.92
m ₃ (J) (mm/h) ⁴		m ₃ (J) (mm/h) ⁴		m ₃ (J) (mm/h) ⁴		m ₃ (J) (mm/h) ⁴	
-0.010	-0.016	0.001	0.004	0.0057	-0.0295	0.0027	-0.0008

Tabella 5.12: Parametri $m(J)$, $CV(J)$ e $m_3(J)$ per i tempi di riferimento di dieci minuti, un'ora, dodici ore e tre giorni per le precipitazioni misurate nel 2015 e nel 2016.

In Tabella 5.13 sono riportati i valori dell'intensità media $m(J)$, del coefficiente di variazione $CV(J)$ e del momento del terzo ordine dell'intensità rispetto alla media $m_3(J)$. Come si può notare, i valori dell'intensità media sono leggermente maggiori nel 2016 per i tempi di riferimento più brevi, mentre per intervalli temporali maggiori alle dodici ore sono maggiori nel 2015. Questo potrebbe essere dovuto al periodo di misurazione: nel 2016 infatti i pluviometri sono stati smontati la prima metà di ottobre andando a perdere le precipitazioni di tipo autunnale, più lunghe, ma con intensità minori, che invece sono state registrate nel 2015. I valori del coefficiente di variazione non presentano differenze rilevanti fra un anno e l'altro, il momento del terzo ordine, per i periodi di riferimento più brevi, al contrario, presenta valori nettamente superiori nel 2016 rispetto al 2015. Ciò va a confermare quanto si può osservare nel Grafico 1, ovvero che il 2016 è stato interessato da un maggior numero di eventi ad alta intensità, che vanno a sbilanciare la distribuzione delle intensità verso destra.

Anche il *Grafico 5.24*, in cui sono riportate le frequenze delle intensità per i due anni su base temporale di dieci minuti, un'ora, dodici ore e tre giorni conferma che nel 2016 si è assistito ad un numero di eventi ad alta intensità maggiore, nonostante nel 2015 si sia avuto un singolo evento, con un massimo di intensità di 84,0 mm/h su base temporale di dieci minuti e di 27,4 mm/h su base oraria, che supera le massime intensità registrate nel 2016.

Un'altra cosa che si nota dal *Grafico 5.24* è che nel 2015, considerando la base temporale di un'ora, a differenza di quanto avviene nel 2016, la frequenza dei valori di intensità di 1,4 mm/h, 2,0 mm/h, 2,4 mm/h e 2,8 mm/h risulta maggiore di quella dei valori di intensità immediatamente inferiori. Nonostante questo il trend generale si presenta molto simile fra le due annate. Anche per i tempi di riferimento di dodici ore e tre giorni il comportamento fra i due anni è simile, pur presentando le distribuzioni di frequenza un andamento meno regolare.

Si è deciso anche di confrontare le concordanze fra i pluviometri di monte e di valle per le annate 2015 e 2016.

Dal *Grafico 5.25* si può osservare che per la base temporale di dieci minuti le intensità registrate nel 2015 presentano una concordanza maggiore rispetto a quelle del 2016. I valori del parametro R^2 sono di 0,27 e 0,16 rispettivamente per il 2015 e il 2016, mentre i coefficienti angolari variano da 0,62 a 0,56, sempre fra il 2015 e il 2016.

Considerando la base temporale di un'ora invece, il valore di R^2 è maggiore nel 2015, 0,64 contro 0,59 del 2016, mentre il coefficiente angolare presenta un valore più vicino all'unità nel 2016: 0,98 rispetto a 0,89 nel 2015. Il maggior valore di R^2 nel 2015 sta ad indicare che gli eventi del 2016 presentano una variabilità fra monte e valle maggiore rispetto a quelli del 2015.

Per la base temporale di dodici ore si può notare che, soprattutto nel 2015, ma anche nel 2016 si hanno un coefficiente angolare e un parametro R^2 con valori molto vicini all'unità. Lo stesso vale considerando la base temporale di tre giorni.

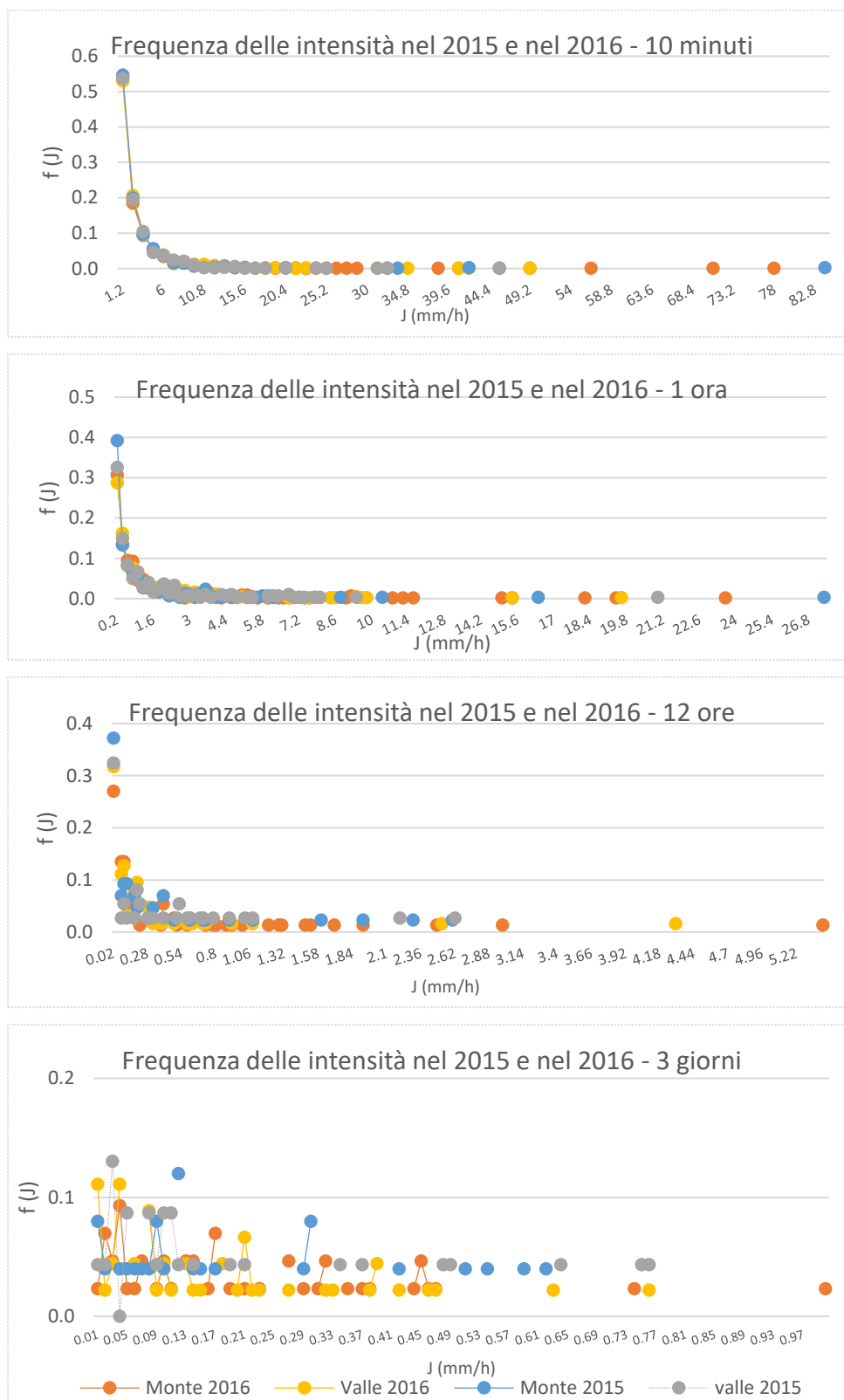


Grafico 5.24: Distribuzione della frequenza delle intensità di precipitazione per le basi temporali di dieci minuti e un'ora, 12 ore e 3 giorni, nel 2015 e nel 2016.

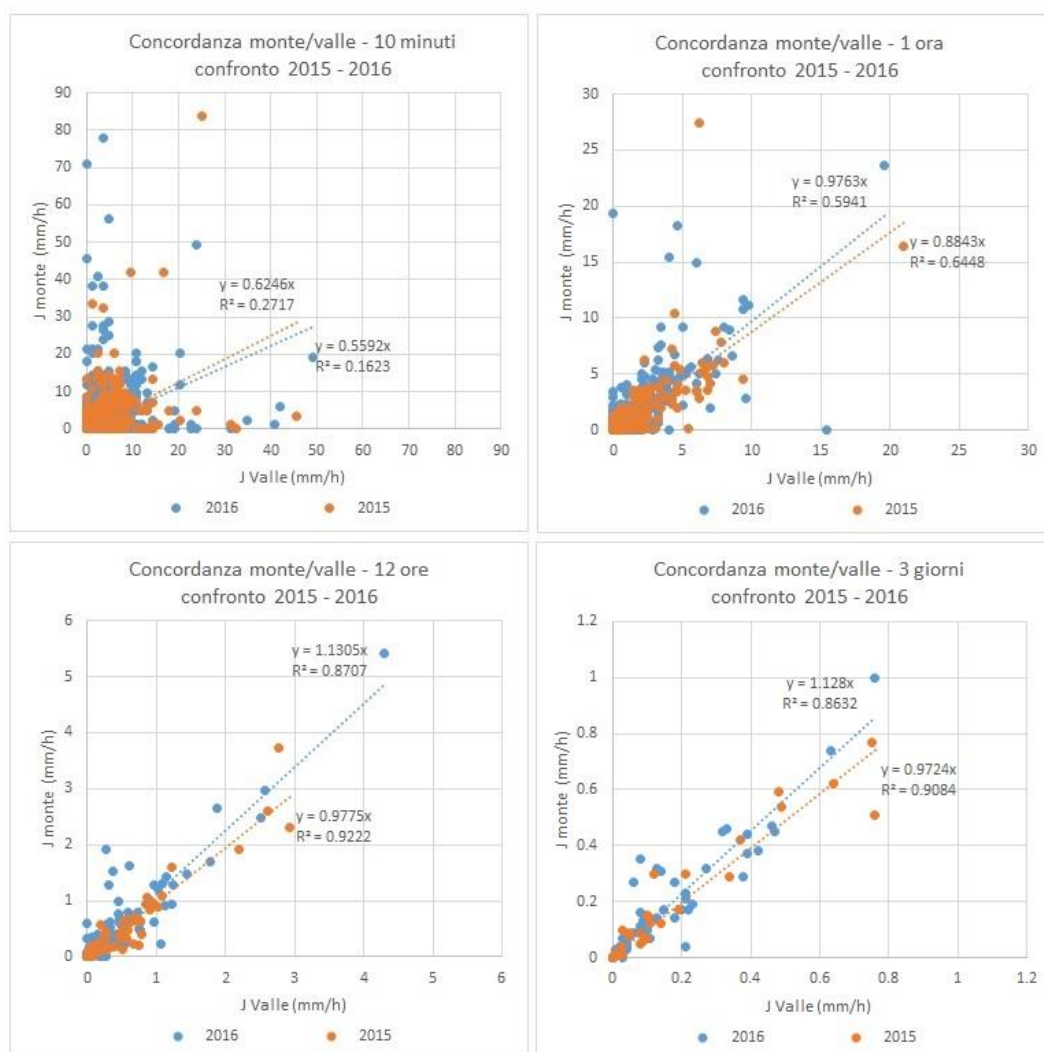


Grafico 5.25: Concordanza fra i pluviometri di monte e di valle su base temporale di dieci minuti, un'ora, dodici ore e tre giorni nel 2015 e nel 2016.

Capitolo 6

Conclusioni

Dopo il lavoro di installazione del sistema di monitoraggio, la raccolta dei dati relativi agli eventi di precipitazioni e trasporto solido avvenuti all'interno del sito da colate di detriti del Rio Acquabona e l'elaborazione di questi ultimi è doveroso trarre alcune conclusioni.

Per quanto concerne il sistema di monitoraggio, è possibile affermare che la configurazione utilizzata durante il 2016 si è rivelata sufficientemente affidabile, fatto salvo un iniziale inconveniente dovuto ad un collegamento della telecamera della stazione di valle che ha ceduto interrompendo l'acquisizione delle immagini e un episodio in cui, a seguito di un'interruzione della fornitura di corrente elettrica, l'unità UPS non si è riavviata. Fortunatamente questi inconvenienti non sono andati ad inficiare il lavoro svolto, in quanto sono avvenuti in periodi in cui non vi era la necessità di acquisire dati dalla stazione di valle.

I tre pluviometri hanno funzionato bene durante tutto il periodo di monitoraggio ed hanno permesso di raccogliere i dati sulle precipitazioni in maniera completa ed affidabile.

Purtroppo, non è stato possibile rendere operativa la nuova stazione intermedia, ma la struttura e la strumentazione che andrà ad equipaggiarla sono già pronte per essere installate il prossimo anno, non appena sarà realizzato un collegamento della stazione con la linea elettrica.

Dall'analisi dei dati di precipitazione si sono potute trarre le seguenti conclusioni. I valori dei massimi di intensità a monte sono quasi doppi rispetto a quelli di valle se si considerano dei tempi di riferimento brevi, mentre per tempi maggiori la differenza si attenua. Le precipitazioni registrate nei tre pluviometri, inoltre,

presentano una concordanza molto bassa per precipitazioni di breve durata, mentre considerando delle basi temporali estese la concordanza è elevata. Addirittura, per eventi molto intensi a monte, a valle sono state registrati valori di intensità molto bassi. Queste osservazioni dimostrano la grande variabilità spazio-altimetrica delle precipitazioni intense, ma di breve durata che avvengono all'interno del sito. Le precipitazioni di durata maggiore ed intensità minore presentano invece una minor variabilità nello spazio.

Dall'osservazione delle frequenze delle intensità si è notato che la maggior parte delle precipitazioni che avvengono nell'area di studio sono a bassa intensità: gli eventi ad alta intensità sono pochi e spesso inseriti come picchi all'interno di eventi con intensità minori. Questi picchi possono essere in numero pari a uno o superiore e non hanno una collocazione caratteristica all'interno dell'evento. I modelli che meglio descrivono gli eventi ad alta intensità osservati sono lo ietogramma Desbordes e lo ietogramma Chicago, in quanto permettono di considerare un picco di intensità all'interno di un evento con intensità minori e di posizionare questo picco in diverse posizioni all'interno dell'evento.

Dall'analisi congiunta degli eventi di massa e delle precipitazioni si è potuto notare che non sono solamente gli eventi ad alta intensità a scatenare eventi di colata o di scorrimento. L'evento di colata avvenuto il 15 giugno nel canale adiacente e lo scorrimento superficiale verificatosi nel canale in studio il 17 settembre, infatti, sono stati innescati da precipitazioni con intensità contenute, ma di durata piuttosto elevata.

Nel caso degli eventi di scorrimento del 13 luglio e del 17 settembre è stato possibile stimare il tempo di corrvazione fra la zona di alimentazione del canale di colate e la stazione di valle. Tale tempo è stato calcolato di un'ora e venticinque minuti per l'evento di luglio e di un'ora e trentacinque minuti per l'evento di settembre, dati che concordano con i tempi di corrvazione ottenuti dall'analisi degli eventi già l'anno precedente.

Bibliografia

- [1] *Carta Geologica D'Italia 1:50.000, Foglio 29, Cortina d'Ampezzo*, www.isprambiente.it;
- [2] TANCON F., *Rilievo ed interpretazione di alcuni parametri geomorfologici dell'area da colate detritiche del Rio Acquabona (Alpi Orientali, BL, Italia)*, Tesi di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia Tecnica, Padova, 2014;
- [3] SCOTTON P., GENEVOIS R., MORO F., ZORZI L., GIRARDI G., PRATICELLI N., *The new debris-flows monitoring system of Acquabona torrent (Cortina D'Ampezzo, BL, Italy)*, Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, 2011;
- [4] BERTI M., GENEVOIS R., LA HUSEN R., SIMONI A., TECCA P. R., *Debris Flow Monitoring in the Acquabona Watershed on the Dolomites (Italian Alps)*, Phys. Chem. Earth (B), Vol. 25, No. 9, pp. 707-715, 2000;
- [5] ARTINA S., CALEND A G., CALOMINO F., CAO C., LA LOGGIA G., MODICA C., PAOLETTI A., PAPIRI S., RASULO G., VELTRI P., *Sistemi di Fognatura – Manuale di Progettazione*, Hoepli, 2001
- [6] TARDIVO L., *Analisi di laboratorio e di campo di alcuni aspetti della dinamica degli ammassi granulari*, Tesi di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia Tecnica, Padova, 2015;

Ringraziamenti

Alla fine di questo lavoro durato otto mesi sono doverosi alcuni ringraziamenti.

Primo fra tutti vorrei ringraziare il professor Scotton per la competenza, professionalità e disponibilità con cui mi ha seguito durante tutto il percorso che ha portato alla stesura di questa tesi, rendendo questa esperienza decisamente positiva sul piano umano oltre che accademico.

Un ringraziamento particolare per il supporto fornito nell'attività sul campo va a Emiliano Casagrande, il cui aiuto è stato decisivo nell'installazione dei pluviometri e nel montaggio della stazione di valle, e Daniele Rossi che ha collaborato alla raccolta dei dati dai pluviometri.

Un ringraziamento va poi a Lerri Baldo, titolare della ditta che ha montato la struttura della stazione intermedia, per l'ospitalità e il pranzo offertoci in una fredda giornata di pioggia, oltre che per averci fornito dei guanti da lavoro.

Si ringrazia inoltre il Comune di Cortina d'Ampezzo per aver fornito la corrente elettrica alla stazione di valle e la SIM che ha permesso il collegamento con quest'ultima tramite la rete internet.

Un pensiero va poi a tutti gli amici e i parenti che mi hanno accompagnato e sostenuto durante la carriera universitaria: ragazzi, vorrei ringraziarvi uno a uno, ma avrei bisogno di troppe pagine.

Un grazie speciale alla mia splendida ragazza, Francesca, per l'affetto e l'incoraggiamento datomi negli ultimi mesi.

Ma il ringraziamento più grande va a mia sorella Silvia e ai miei genitori per tutto l'amore e il sostegno che mi hanno sempre dato e senza i quali non sarei mai stato in grado di raggiungere questo traguardo. Grazie.

Allegati

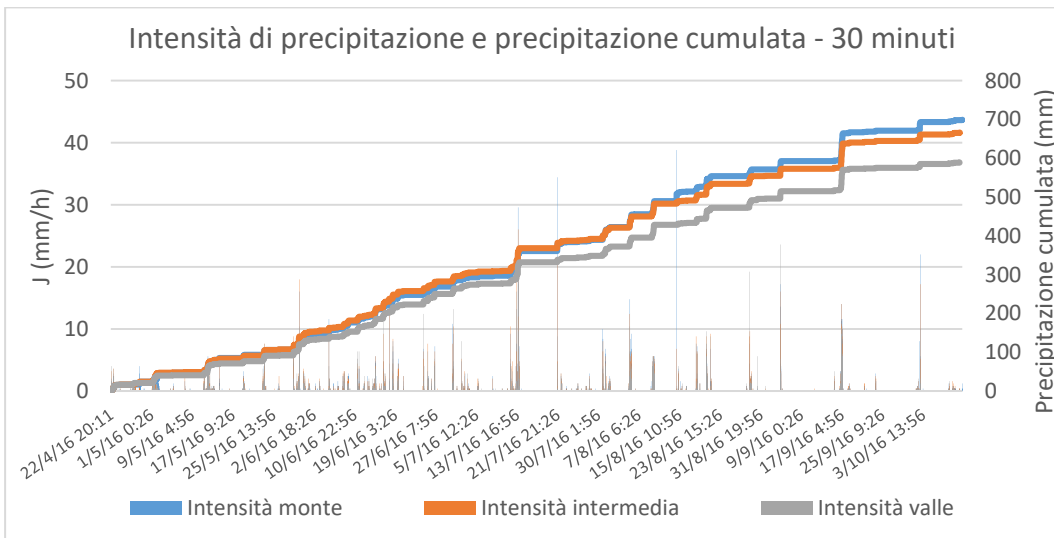
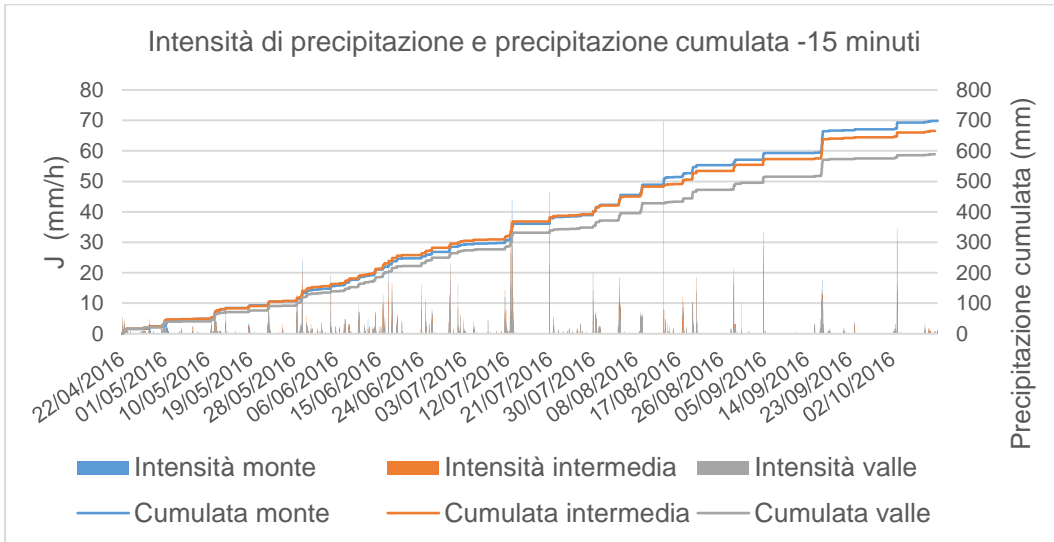
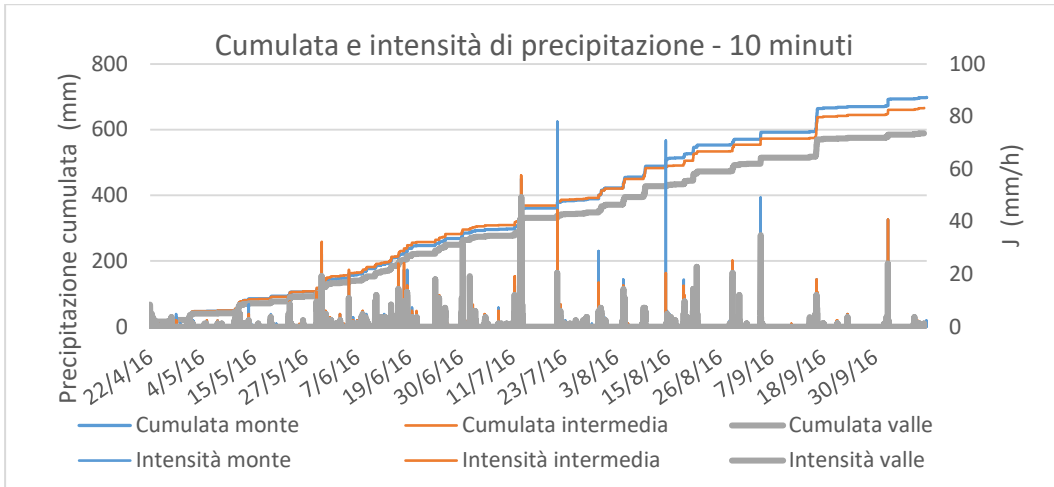
In questa sezione sono riportati tutti quei grafici e tabelle che sono stati prodotti nella stesura di questa tesi e utilizzati nell'elaborazione dei dati, ma che per problemi di spazio non sono stati inseriti all'interno del testo.

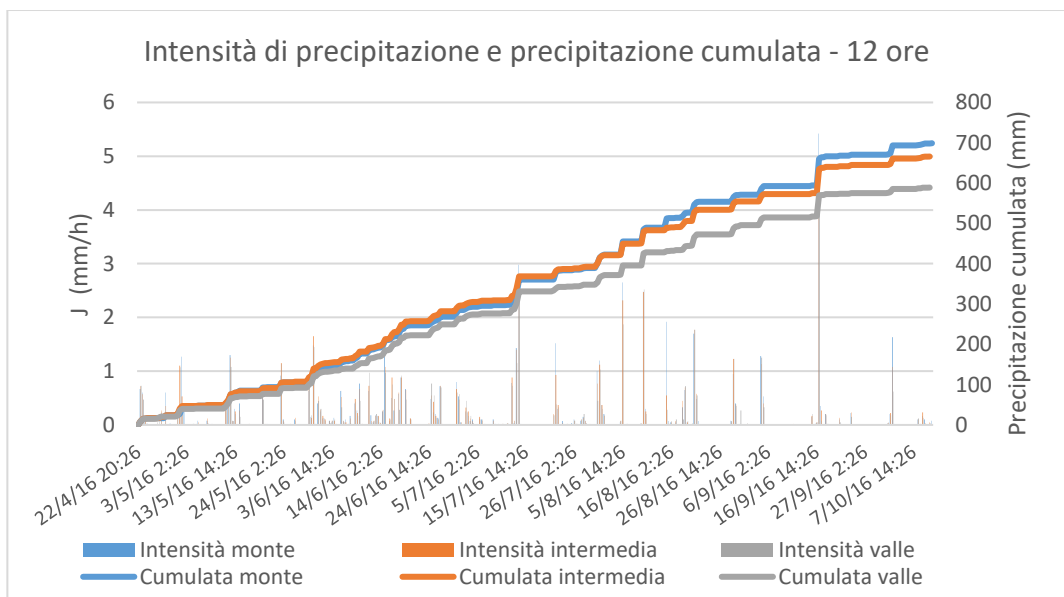
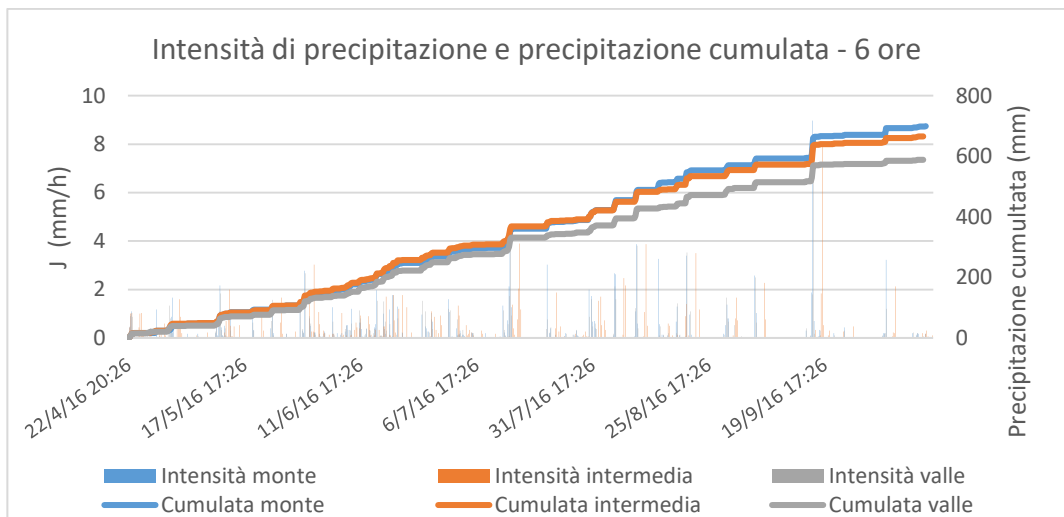
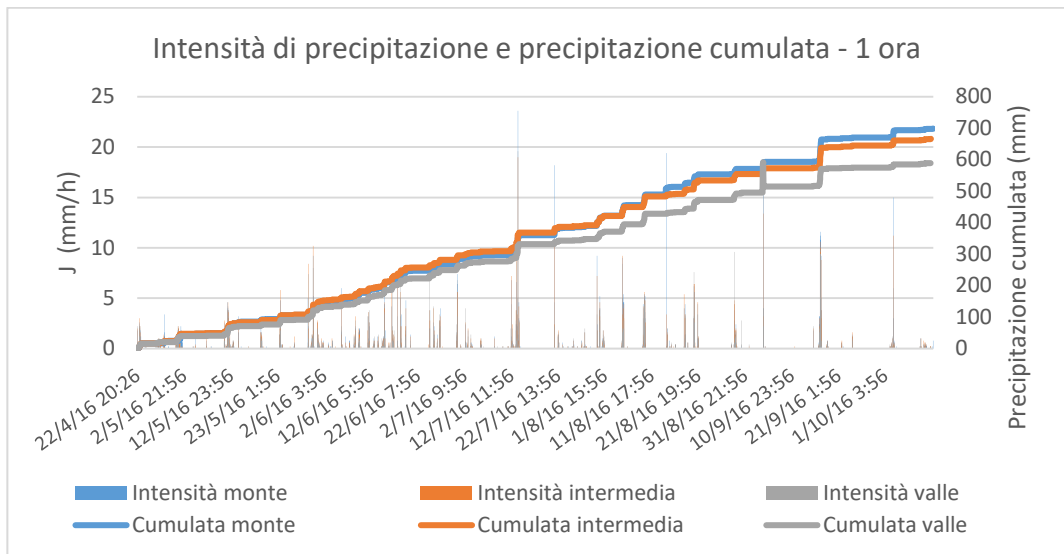
Indice degli allegati

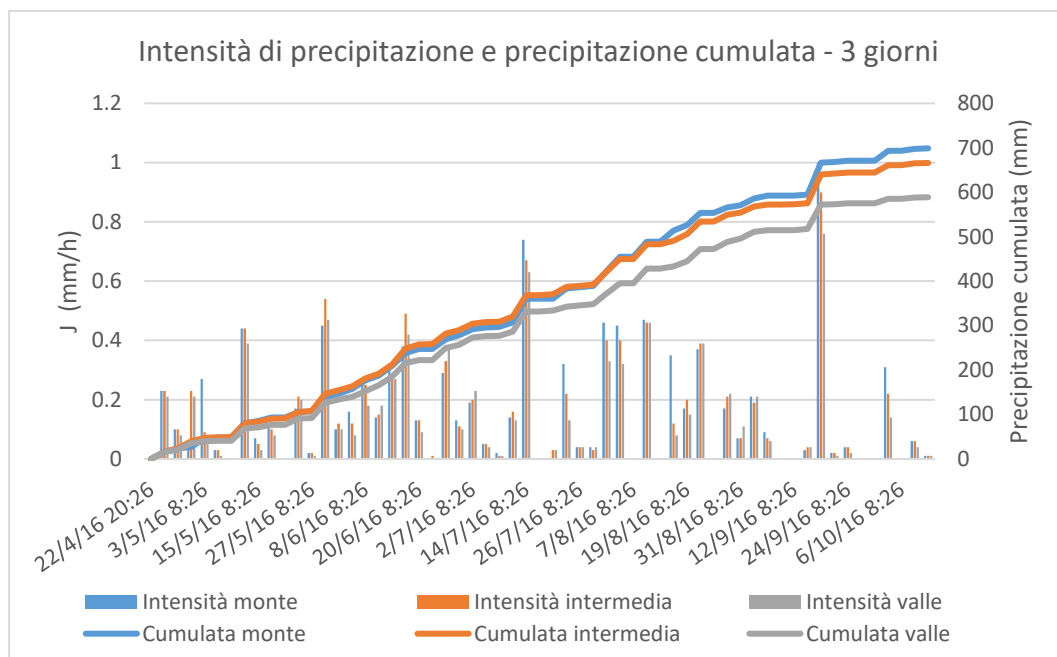
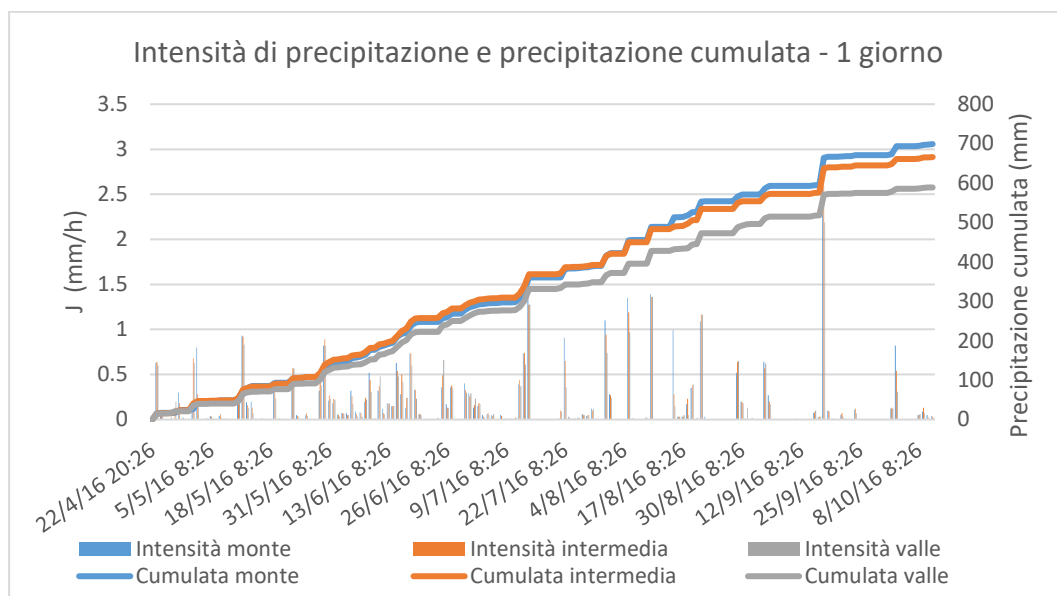
Allegato 1	Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata per varie basi temporali.	I
Allegato 2	Concordanza fra le varie stazioni per diverse basi temporali.	V
Allegato 3	Distribuzione delle frequenze di intensità per diverse basi temporali.	VII
Allegato 4	Eventi di precipitazione avvenuti nel periodo di monitoraggio.	IX
Allegato 5	Dati riassuntivi dei principali eventi di precipitazione avvenuti nel periodo di monitoraggio.	XI
Allegato 6	Grafici di intensità di precipitazione e precipitazione cumulata dei principali eventi avvenuti nel periodo di monitoraggio.	XV

Allegato 1

Intensità di precipitazione e precipitazione cumulata per varie basi temporali.

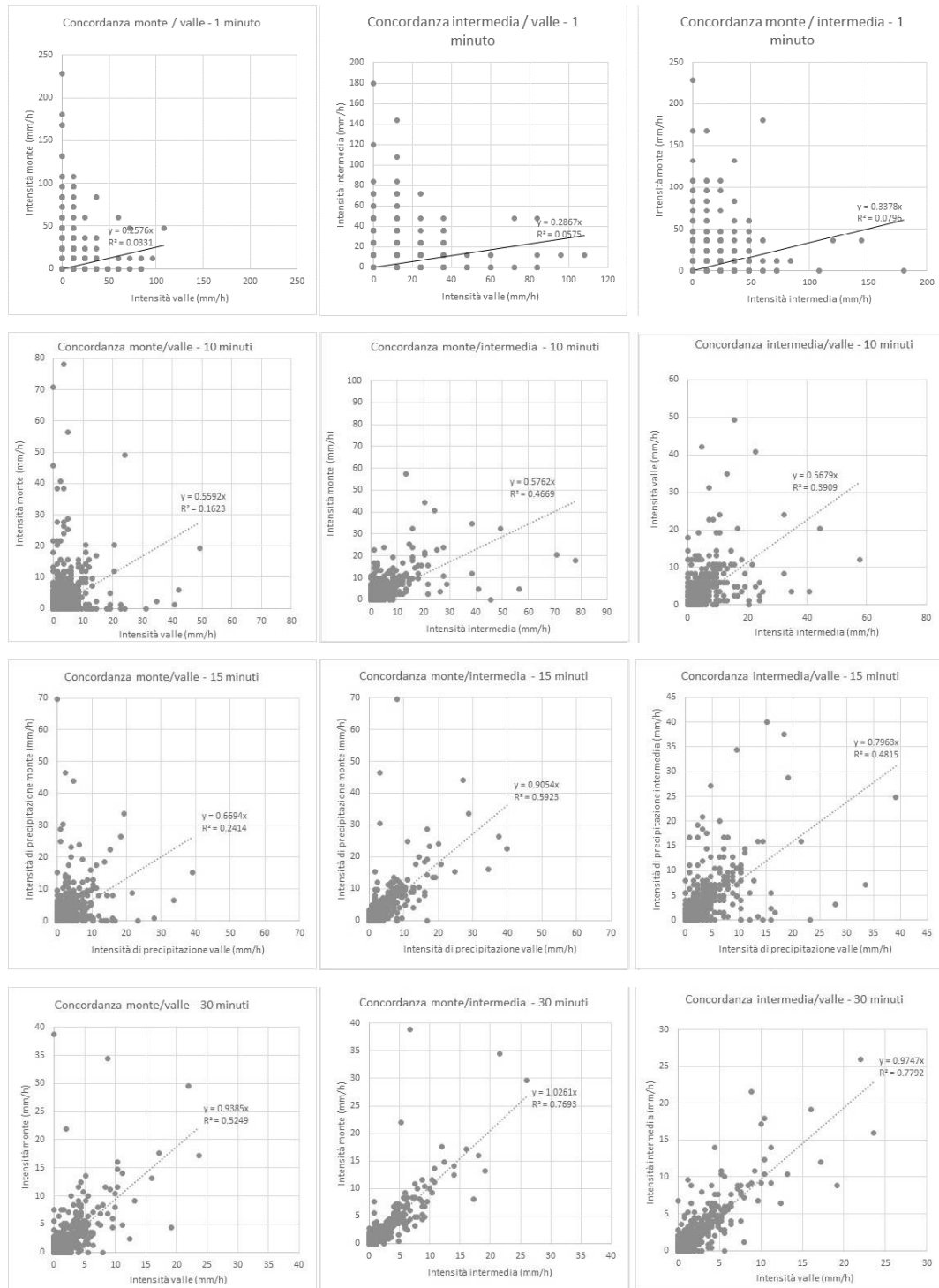


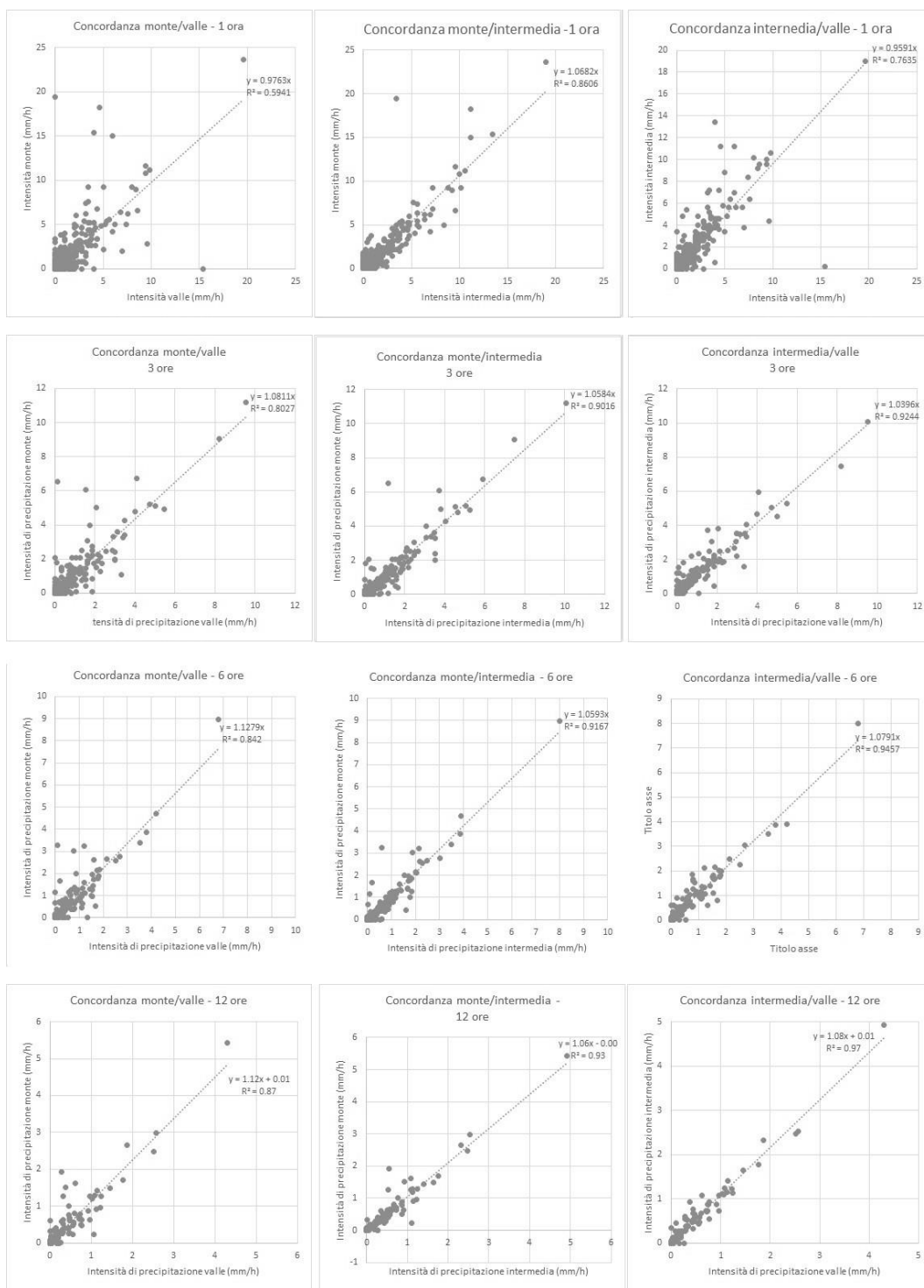


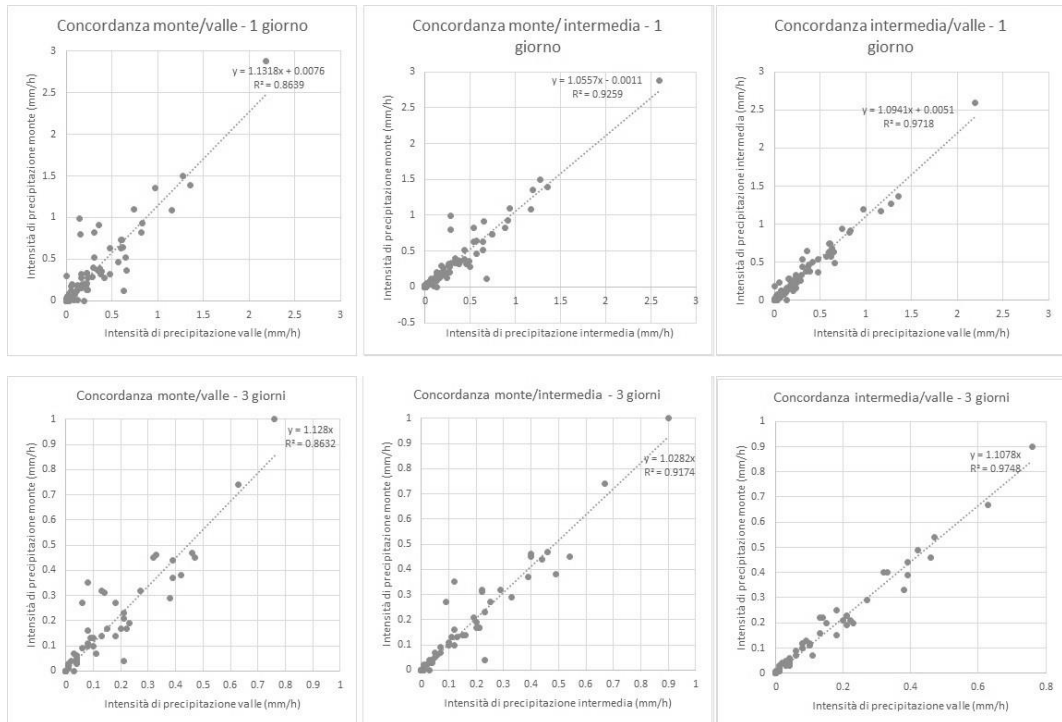


Allegato 2

Concordanza fra le varie stazioni per diverse basi temporali.

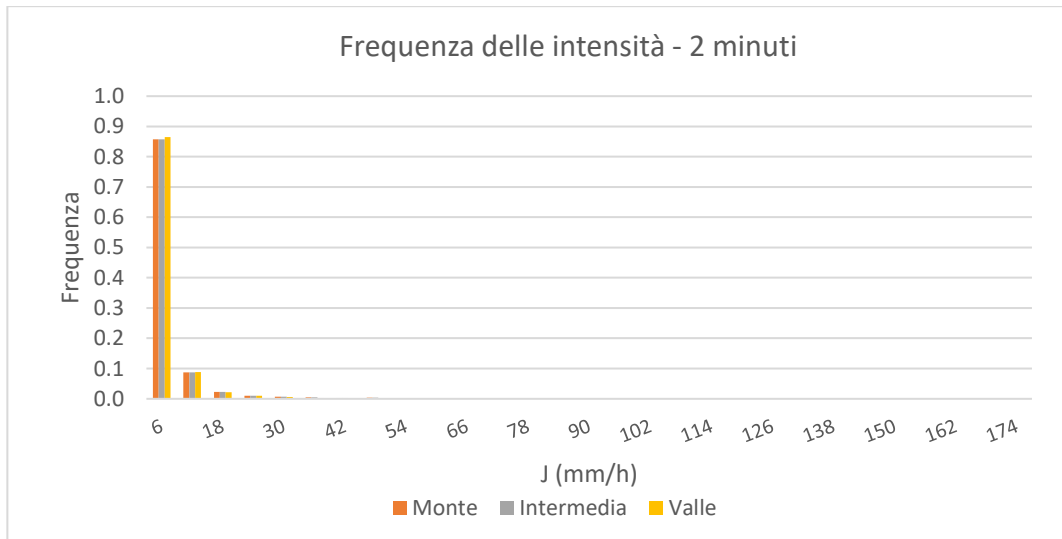


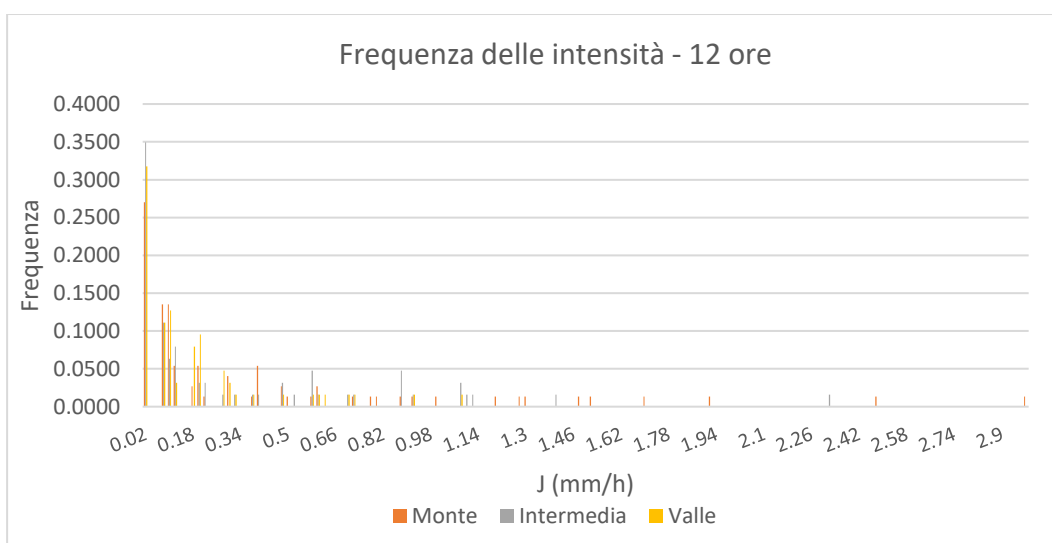
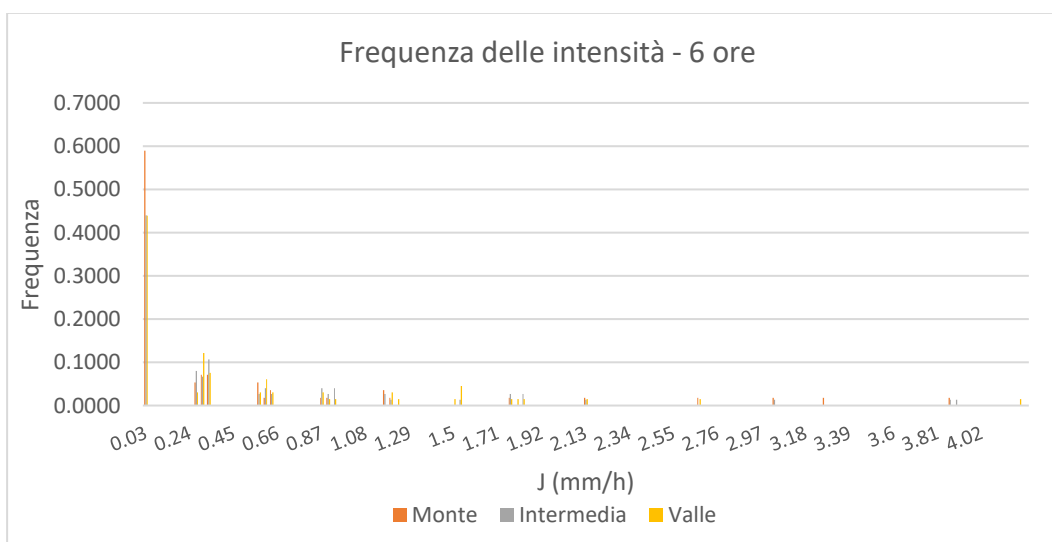
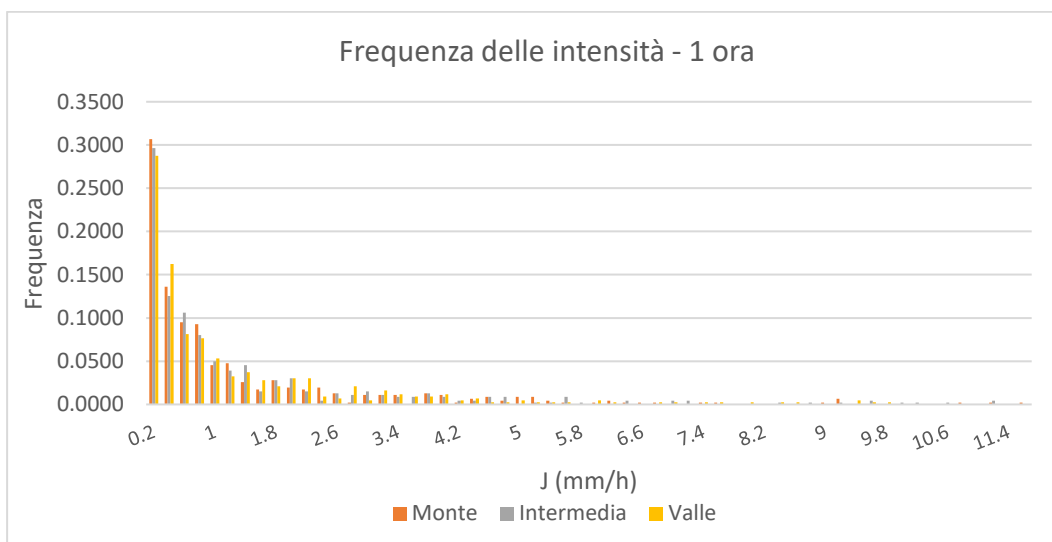




Allegato 3

Distribuzione delle frequenze di intensità per diverse basi temporali.





Allegato 4

Eventi di precipitazione avvenuti nel periodo di monitoraggio (dati su base temporale di 10 minuti).

Numero evento	classe	J_{\max} (mm/h)	ora inizio	durata (h)
1	B	8.4	22/4/16 20:23	1.39
2	A	4.8	23/4/16 5:01	10.08
3	A	3.6	27/4/16 13:51	1.42
4	A	4.8	28/4/16 11:21	6.58
5	A	3.6	1/5/16 6:41	30.42
6	A	3.6	5/5/16 9:11	0.92
7	A	3.6	11/5/16 12:41	4.58
8	A	4.8	12/5/16 12:21	5.58
9	B	7.2	14/5/16 14:31	1.58
10	A	4.8	19/5/16 9:51	7.75
11	B	9.6	23/5/16 10:41	7.58
12	A	3.6	26/5/16 15:41	1.58
13	C	13.2	29/5/16 14:51	1.92
14	A	4.8	30/5/16 6:11	1.75
15	D	32.4	30/5/16 14:26	4.75
16	B	6	31/5/16 15:01	3.75
17	A	3.6	1/6/16 14:11	1.75
18	A	4.8	3/6/16 19:21	3.42
19	D	48.0	5/6/16 18:41	3.25
20	A	3.6	6/6/16 16:21	0.58
21	A	3.6	7/6/16 13:31	1.92
22	A	3.6	8/6/16 12:31	1.75
23	B	6	8/6/16 17:41	4.08
24	A	3.6	9/6/16 12:51	6.75
25	B	9.6	11/6/16 12:51	2.75
26	C	12	11/6/16 19:01	2.25
27	A	3.6	12/6/16 18:41	5.08
28	A	4.8	13/6/16 14:21	6.42
29	B	8.4	14/6/16 21:01	9.25
30	A	3.6	16/6/16 7:51	0.08
31	D	24	16/6/16 17:26	2.44
32	D	24	17/6/16 22:51	0.75
33	D	21.6	18/6/16 14:11	3.92
34	B	7.2	19/6/16 13:31	4.75
35	B	6	20/6/16 18:11	0.58
36	C	19.2	24/6/16 18:31	3.58

37	C	12.0	25/6/16 16:11	5.75
38	A	4.8	26/6/16 11:01	0.92
39	B	8.4	27/6/16 0:21	2.58
40	D	26.4	30/6/16 15:41	3.42
41	D	30	30/6/16 22:31	0.42
42	C	18	2/7/16 13:21	1.42
43	B	7.2	3/7/16 3:31	0.42
44	B	6	3/7/16 16:11	1.58
45	A	4.8	5/7/16 18:31	4.92
46	B	7.2	8/7/16 19:51	1.42
47	C	19.2	12/7/16 10:13	1.42
48	B	9.6	12/7/16 17:51	0.58
49	D	40.8	13/7/16 14:51	1.27
50	E	56.4	13/7/16 20:51	7.08
51	E	78	21/7/16 20:06	0.75
52	B	8.4	22/7/16 12:51	1.08
53	A	3.6	22/7/16 14:01	4.25
54	A	3.6	28/7/16 7:11	2.25
55	D	28.8	30/7/16 23:26	2.08
56	B	8.4	31/7/16 9:51	5.42
57	A	3.6	1/8/16 11:41	1.08
58	A	3.6	5/8/16 5:41	0.92
59	C	18	5/8/16 9:21	9.42
60	B	7.2	9/8/16 21:51	1.92
61	B	7.2	10/8/16 2:31	7.25
62	E	70.8	14/8/16 20:56	0.92
63	B	6	15/8/16 3:51	0.92
64	A	4.8	15/8/16 15:21	0.08
65	A	3.6	15/8/16 23:21	0.25
66	C	15.6	18/8/16 18:41	0.58
67	C	12	18/8/16 22:41	3.42
68	A	3.6	19/8/16 13:21	0.25
69	C	15.6	20/8/16 20:11	5.75
70	D	24	21/8/16 17:01	3.36
71	D	24	21/8/16 17:01	3.36
72	C	12	31/8/16 3:01	0.58
73	D	21.6	4/9/16 19:11	2.75
74	A	3.6	15/9/16 15:11	1.08
75	C	18	16/9/16 19:46	14.00
76	A	4.8	23/9/16 23:41	1.42
77	A	3.6	2/10/16 15:11	1.25
78	D	40.8	2/10/16 22:31	2.17
79	A	3.6	8/10/16 19:21	0.75

Allegato 5

Dati riassuntivi dei principali eventi di precipitazione avvenuti nel periodo di monitoraggio (base temporale di 10 minuti).

Evento 15 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	30/5/16 14:26	30/5/16 14:33	30/5/16 14:41
Ora fine	30/5/16 19:06	30/5/16 19:13	30/5/16 19:11
m(t)	30/5/16 17:51	30/5/16 17:43	30/5/16 17:42
h_{tot} (mm)	16.6	18.2	16
J_{max} (mm/h)	27.6	32.4	19.2
m(J) (mm/h)	3.6	3.9	3.6
s(J) (mm/h)	5.9	6.5	4.7
$m_3(J)$ (mm/h) ³	548.589	842.192	190.108
s(t) (h ^{1/2})	0.94	1.04	1.13
$m_3(t)$ (h ²)	-1.66	-1.70	-1.98
Trasporto solido	ND		
Trasporto liquido	ND		
Assenza di trasporto	ND		

Evento 31 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	16/6/16 17:26	16/6/16 17:33	16/6/16 17:31
Ora fine	16/6/16 19:46	16/6/16 19:53	16/6/16 19:51
m(t)	16/6/16 18:36	16/6/16 18:43	16/6/16 18:41
h_{tot} (mm)	6	10.6	9
J_{max} (mm/h)	9.6	24	14.4
m(J) (mm/h)	2.4	4.2	3.6
s(J) (mm/h)	2.9	6.5	4.5
$m_3(J)$ (mm/h) ³	28.339	535.836	131.328
s(t) (h ^{1/2})	2.16	2.28	2.20
$m_3(t)$ (h ²)	-2.98	-3.97	-3.38
Trasporto solido	ND		
Trasporto liquido	ND		
Assenza di trasporto	ND		

Evento 32 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	17/6/16 22:56	17/6/16 22:53	17/6/16 22:51
Ora fine	17/6/16 23:36	17/6/16 23:33	17/6/16 23:31
m(t)	17/6/16 23:16	17/6/16 23:13	17/6/16 23:11
h_{tot} (mm)	7.0	7.2	3.4
J_{max} (mm/h)	21.6	24.0	9.6
m(J) (mm/h)	8.4	8.6	4.1
s(J) (mm/h)	9.56	9.65	3.66
$m_3(J)$ (mm/h) ³	342.144	514.833	24.551
s(t) (h ^{1/2})	0.60	0.53	0.57
$m_3(t)$ (h ²)	-0.09	-0.06	-0.06
Trasporto solido	ND		
Trasporto liquido	ND		
Assenza di trasporto	ND		

Evento 33 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	18/6/16 14:26	18/6/16 14:23	18/6/16 14:11
Ora fine	18/6/16 17:56	18/6/16 18:03	18/6/16 18:01
m(t)	18/6/16 16:11	18/6/16 16:13	18/6/16 16:06
h_{tot} (mm)	10.6	10.6	11
J_{max} (mm/h)	21.6	15.6	13.2
m(J) (mm/h)	2.9	2.8	2.8
s(J) (mm/h)	5.4	4.2	4.1
$m_3(J)$ (mm/h) ³	336.522	123.618	122.621
s(t) (h ^{1/2})	1.92	1.98	2.03
$m_3(t)$ (h ²)	-3.01	-2.86	-2.63
Trasporto solido	ND		
Trasporto liquido	ND		
Assenza di trasporto	ND		

Evento 49 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	13/7/16 14:56	13/7/16 15:03	13/7/16 14:51
Ora fine	13/7/16 17:06	13/7/16 17:13	13/7/16 17:01
m(t)	13/7/16 16:01	13/7/16 16:08	13/7/16 15:56
h_{tot} (mm)	12.8	12.2	10.4
J_{max} (mm/h)	38.4	34.8	40.8
m(J) (mm/h)	5.5	5.2	4.5
s(J) (mm/h)	11.1	10.4	10.6
$m_3(J)$ (mm/h) ³	2752.009	2155.229	3385.636
s(t) (h ^{1/2})	1.98	2.22	1.86
$m_3(t)$ (h ²)	-2.97	-4.53	-2.08
Trasporto solido	NO		
Trasporto liquido	NO		
Assenza di trasporto	SI		

Evento 50 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	13/7/16 20:46	13/7/16 20:53	13/7/16 20:51
Ora fine	13/7/16 22:56	13/7/16 22:23	13/7/16 22:31
m(t)	13/7/16 21:51	13/7/16 21:38	13/7/16 21:41
h_{tot} (mm)	27	22.4	24.6
J_{max} (mm/h)	56.4	57.6	49.2
m(J) (mm/h)	12.5	14.9	14.8
s(J) (mm/h)	17.0	17.0	17.6
$m_3(J)$ (mm/h) ³	7223.400	8078.255	5184.767
s(t) (h ^{1/2})	1.02	0.82	0.77
$m_3(t)$ (h ²)	-0.48	0.01	-0.01
Trasporto solido	SI		
Trasporto liquido	SI		
Assenza di trasporto	NO		

Evento 51 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	21/7/16 20:06	21/7/16 20:13	21/7/16 20:11
Ora fine	21/7/16 21:06	21/7/16 21:03	21/7/16 21:11
m(t)	21/7/16 20:36	21/7/16 20:38	21/7/16 20:41
h_{tot} (mm)	18.4	13.6	6.8
J_{max} (mm/h)	78	44.4	20.4
m(J) (mm/h)	18.4	16.3	6.8
s(J) (mm/h)	30.0	17.2	7.5
$m_3(J)$ (mm/h) ³	39355.008	4185.976	366.784
s(t) (h ^{1/2})	0.53	0.64	0.61
$m_3(t)$ (h ²)	-0.06	-0.13	-0.11
Trasporto solido	NO		
Trasporto liquido	NO		
Assenza di trasporto	SI		

Evento 55 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	30/7/16 23:26	30/7/16 23:33	30/7/16 23:31
Ora fine	31/7/16 1:26	31/7/16 1:23	31/7/16 1:11
m(t)	31/7/16 0:26	31/7/16 0:28	31/7/16 0:21
h_{tot} (mm)	12	9.2	5.2
J_{max} (mm/h)	28.8	16.8	6
m(J) (mm/h)	5.5	4.6	2.8
s(J) (mm/h)	7.8	4.8	1.7
$m_3(J)$ (mm/h) ³	951.308	143.552	2.680
s(t) (h ^{1/2})	1.58	1.61	1.08
$m_3(t)$ (h ²)	-1.55	-1.81	-0.16
Trasporto solido	ND		
Trasporto liquido	ND		
Assenza di trasporto	ND		

Evento 62 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	14/8/16 20:56	14/8/16 21:03	14/8/16 21:31
Ora fine	14/8/16 21:26	14/8/16 21:43	14/8/16 21:51
m(t)	14/8/16 21:11	14/8/16 21:23	14/8/16 21:41
h_{tot} (mm)	19.6	3.6	0.4
J_{max} (mm/h)	70.8	20.4	1.2
m(J) (mm/h)	39.2	5.4	1.2
s(J) (mm/h)	35.2	10.0	0.0
$m_3(J)$ (mm/h) ³	-7685.120	746.496	0.000
$s(t)$ (h ^{1/2})	0.49	0.80	0.29
$m_3(t)$ (h ²)	-0.06	-0.21	-0.01
Trasporto solido	NO		
Trasporto liquido	NO		
Assenza di trasporto	SI		

Evento 71 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	21/8/16 17:06	21/8/16 17:03	21/8/16 17:01
Ora fine	21/8/16 20:16	21/8/16 20:23	21/8/16 20:21
m(t)	21/8/16 18:41	21/8/16 18:43	21/8/16 18:41
h_{tot} (mm)	6.6	7	6.6
J_{max} (mm/h)	20.4	24	22.8
m(J) (mm/h)	1.9	2.0	1.9
s(J) (mm/h)	4.5	5.3	4.9
$m_3(J)$ (mm/h) ³	300.964	505.600	433.209
$s(t)$ (h ^{1/2})	3.19	3.39	3.41
$m_3(t)$ (h ²)	-8.82	-11.43	-10.14
Trasporto solido	ND		
Trasporto liquido	ND		
Assenza di trasporto	ND		

Evento 78 - 10 minuti			
	Monte	Intermedio	Valle
Ora inizio	2/10/16 22:36	2/10/16 22:33	2/10/16 22:31
Ora fine	3/10/16 2:26	3/10/16 2:43	3/10/16 2:51
m(t)	3/10/16 0:31	3/10/16 0:38	3/10/16 0:41
h_{tot} (mm)	19.6	12.8	7.2
J_{max} (mm/h)	40.8	40.8	24
m(J) (mm/h)	5.1	3.1	1.7
s(J) (mm/h)	9.9	8.3	4.7
$m_3(J)$ (mm/h) ³	280.127	4.178	426.409
$s(t)$ (h ^{1/2})	3.95	4.42	4.50
$m_3(t)$ (h ²)	-24.56	-33.74	-33.51
Trasporto solido	NO		
Trasporto liquido	NO		
Assenza di trasporto	SI		

Allegato 6

Grafici di intensità di precipitazione e precipitazione cumulata dei principali eventi avvenuti nel periodo di monitoraggio.

