

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIREZIONE TECNICA

S.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE-FALCONARA

RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228-CASTELPLANIO

ELABORATI GENERALI

RELAZIONE IDROLOGICA

Studio idrologico del bacino del Fiume Esino

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

IR0F 00 R 09 RI ID0001 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE DEFINITIVA	C. Cesali 	ottobre 2021	F. Cabas 	ottobre 2021	C. Urgiuoli 	ottobre 2021	A. Vittozzi  ottobre 2021

ITALFERR S.p.A.  
U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti  
Dott. Ing. A. Vittozzi  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
N° A20783

File: IR0F00R09RIID0001001A.doc

n. Elab.:

## INDICE

1.	PREMESSA.....	5
1.1	RIFERIMENTI NORMATIVI.....	6
2.	INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO.....	7
3.	IL BACINO IDROGRAFICO DEL FIUME ESINO .....	8
3.1	STUDI IDROLOGICI ESISTENTI DISPONIBILI .....	10
4.	STUDIO IDROLOGICO DEL BACINO DEL FIUME ESINO.....	11
4.1	GENERALITÀ .....	11
4.2	METODOLOGIA VA.P.I. – REGIONE MARCHE.....	12
	<i>4.2.1. Va.Pi.: regionalizzazione delle piogge .....</i>	<i>12</i>
4.3	ELABORAZIONE STATISTICA DELLE REGISTRAZIONI PLUVIOMETRICHE .....	18
4.4	CONFRONTO TRA LE CURVE DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA DISPONIBILI PER L'AREA DI STUDIO.....	23
4.5	EVENTI PLUVIOMETRICI E ALLUVIONALI PREGRESSI NELL'AREA DI INTERVENTO .....	24
4.6	MODELLO IDROLOGICO DEL BACINO DEL FIUME ESINO.....	30
	<i>4.6.1. Calibrazione del modello.....</i>	<i>34</i>
	<i>4.6.2. Determinazione degli idrogrammi di piena di progetto.....</i>	<i>39</i>
5.	FIUME ESINO: DEFINIZIONE DELLA PORTATA DI RIFERIMENTO PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE PROVVISORIALI IN ALVEO .....	43
6.	EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE PRECIPITAZIONI .....	45
7.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	50

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA          RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO          PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A

## INDICE DELLE FIGURE

<i>Fig. 1 – Inquadramento generale dell'area di studio.</i>	7
<i>Fig. 2 – Bacino idrografico del Fiume Esino: sottobacini di interesse.</i>	9
<i>Fig. 3 – Va.P.I.: compartimenti di Bologna, Pisa e Roma, sottozone omogenee.</i>	14
<i>Fig. 4 – Isoleee delle altezze medie di pioggia massime annuali della durata di 1 giorno (a) e 1 ora (b).</i>	17
<i>Fig. 5 – Stazioni pluviometriche (e relativi topoieta) di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino di interesse.</i>	19
<i>Fig. 6 – Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica (Tr = 200 anni) ricavate dalle differenti metodologie adottate.</i>	23
<i>Fig. 7 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Arcevia, Campodiegoli, Cantiano, Cingoli, Cupramontana, Esanatoglia.</i>	25
<i>Fig. 8 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Fabriano, Fonte Avellana, Moie, Pioraco, San Giovanni, Sassoferrato.</i>	26
<i>Fig. 9 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso la stazioni pluviometrica di Serralta.</i>	27
<i>Fig. 10 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Arcevia, Campodiegoli, Cantiano, Cingoli, Cupramontana, Esanatoglia.</i>	28
<i>Fig. 11 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Fabriano, Fonte Avellana, Moie, Pioraco, San Giovanni, Sassoferrato.</i>	29
<i>Fig. 12 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso la stazioni pluviometrica di Serralta.</i>	30
<i>Fig. 13 – Costruzione del modello idrologico del sottobacino del Fiume Esino in esame in HEC HMS.</i>	31
<i>Fig. 14 – Bacino del Fiume Esino: carta del Curve Number (AMC II).</i>	32
<i>Fig. 15 – Fiume Esino: ubicazione idrometro di Camponococchio.</i>	36
<i>Fig. 16 – Fiume Esino: ubicazione idrometro di Moie.</i>	36
<i>Fig. 17 – Modello idrologico del F. Esino, calibrazione (evento 2013): idrogrammi di piena a Camponococchio e a Moie.</i>	37
<i>Fig. 18 – Simulazione dell'evento del 2017: idrogrammi di piena registrato e da modello HecHMS.</i>	38
<i>Fig. 19 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per Tr = 50 anni.</i>	41
<i>Fig. 20 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per Tr = 200 anni.</i>	42
<i>Fig. 21 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per Tr = 500 anni.</i>	42

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA          RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO          PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A

Fig. 22 – Fiume Esino a Camponoecchio: curva di durata delle portate (fonte: Annali idrologici della Regione Marche)..... 43

Fig. 23 – Fiume Esino a Moie: curva di durata delle portate (fonte: Annali idrologici della Regione Marche). .... 44

Fig. 24 – Precipitazione massima giornaliera (mm), scenario RCP4.5. Mappe delle variazioni previste dai modelli climatici per i tre orizzonti temporali 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga), 2061-2090 (terza riga). ..... 46

Fig. 25 – Precipitazione massima giornaliera (mm), scenario RCP8.5. Mappe delle variazioni previste dai modelli climatici per i tre orizzonti temporali 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga), 2061-2090 (terza riga). ..... 47

Fig. 26 – Stazioni pluviometriche di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino in esame: serie storiche di dati di altezza di pioggia con durata pari a 24 ore (nel periodo climatologico 1971-2000). ..... 48

## INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1 – Sottobacini di interesse del Fiume Esino: dati morfometrici. .... 9

Tab. 2 – Fiume Esino: valori di portata al colmo, per un tempo di ritorno di 200 anni, a Moie e a Mergo. .... 10

Tab. 3 – Fiume Esino: valori di portata al colmo, per un tempo di ritorno di 50 anni, alla confluenza di T. Sentino e T. Esinante. .... 10

Tab. 4 – Va.P.I.: valori dei parametri  $a$  e  $n$  della curva di possibilità climatica, per il sottobacino di interesse del Fiume Esino. .... 18

Tab. 5 – Stazioni pluviometriche di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino di interesse. .... 18

Tab. 6 – Stazioni pluviometriche di riferimento: valori dei parametri  $a$  e  $n$ . .... 22

Tab. 7 – Valori del CN (II e III, AMC) per i sottobacini del Fiume Esino considerati. .... 33

Tab. 8 – Valori del parametro SCS lag per i sottobacini del Fiume Esino considerati. .... 34

Tab. 9 – Modello idrologico del Fiume Esino: caratteristiche dei tratti fluviali. .... 34

Tab. 10 – Percentuali di superficie dei singoli sottobacini del Fiume Esino considerati ricadente nei topoi dei delle stazioni pluviometriche di riferimento. .... 35

Tab. 11 – Fiume Esino: valori di portata al colmo per  $Tr = 200$  anni: CPP Gumbel vs Va.P.I. .... 39

Tab. 12 – Fiume Esino: valori di portata al colmo per  $Tr = 200$  anni, Va.P.I., per diversi valori della durata di pioggia critica. .... 40

Tab. 13 – Fiume Esino: valori di portata al colmo di progetto per vari tempi di ritorno. .... 41

Tab. 14 – Valori medio e previsti dai quattro modelli meteo climatici di variazione di precipitazione massima giornaliera nell'area di intervento (ISPRA, 2015). .... 48

## 1. **PREMESSA**

Il presente elaborato è parte integrante del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica “*Potenziamento infrastrutturale Orte-Falconara. Raddoppio della tratta PM228-Castelplanio*”.

Tale progetto è suddiviso nei 3 Lotti Funzionali di seguito elencati:

- Lotto 1: da PM228 a Bivio Nord Albacina da progressiva Km 0+00 (Km 228+014 della LS) alla progressiva Km 7+200 di progetto
- Lotto 2: da Bivio Nord Albacina a Serra San Quirico (i) da progressiva Km 0+00 (Km 237+589 della LS) alla progressiva Km 8+889 (Km 246+958 della LS)
- Lotto 3: da Serra San Quirico (e) a Castelplanio (e) da progressiva Km 0+00 a progressiva Km 6+272 (Km 252+578 della LS).

Nel 2003 era stato redatto da ITALFERR Spa il progetto preliminare nell’ambito della Legge Obiettivo che già teneva conto della suddivisione nei 3 Lotti Funzionali sopra descritti. Rispetto al tracciato previsto in tale Progetto, che non ha ricevuto alcuna approvazione da parte degli Enti, il tracciato del PFTE in oggetto è stato aggiornato per tenere conto degli aggiornamenti normativi intercorsi.

Da punto di vista idrologico-idraulico, la tratta ferroviaria in progetto si sviluppa interamente in affiancamento al Fiume Esino, attraversando quest’ultimo in vari punti, lungo il tracciato, in ognuno dei tre lotti previsti. È stato condotto quindi lo studio idrologico del bacino del Fiume Esino finalizzato alla valutazione delle portate al colmo di progetto e dei relativi idrogrammi di piena da imporre/assumere come condizione al contorno nei modelli numerici idraulici sviluppati.

Lo studio idrologico si compone delle seguenti fasi:

- analisi statistica delle registrazioni pluviometriche presso le stazioni di misura di riferimento per la definizione dell’altezza totale di precipitazione, nonché della precipitazione netta, ovvero la componente di precipitazione che partecipa al deflusso, al netto della perdite idrologiche (i.e. immagazzinamento superficiale, vegetazione, evaporazione, infiltrazione);
- applicazione delle procedure di regionalizzazione delle piogge (i.e. VA.P.I.) disponibili per l’area di studio;
- trasformazione *afflussi-deflussi* per il calcolo delle portate al colmo e delle caratteristiche delle corrispondenti onde di piena, per vari tempi di ritorno.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDROLOGICA</b></p>	<p>COMMESSA IR0F</p>	<p>LOTTO 00 R 09</p>	<p>CODIFICA RI</p>	<p>DOCUMENTO ID0001 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 6 di 50</p>

Le analisi sono state sviluppate nel rispetto della Pianificazione di Bacino attualmente in vigore, in particolare del PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO dell'ex Autorità di Bacino della Regione Marche (ultimo aggiornamento con DCI n. 68 del 08/08/2016), nonché nel PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI (di recente emanazione) dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale - P.G.R.A.A.C. (Il ciclo di pianificazione, agg. Dicembre 2019, Approvazione definitiva prevista per il 2021).

## 1.1 Riferimenti normativi

Il progetto è stato redatto nel rispetto delle seguenti norme:

- Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE
- Direttiva Alluvioni 2007/60/CE
- D.Lgs. n. 152/2006 - T.U. Ambiente
- R.D. 25/07/1904, N. 523 "Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie"
- Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018) e relativa circolare applicativa n.7/2019
- "*Manuale di Progettazione delle Opere Civili*" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI);
- Piano di Assetto Idrogeologico - Regione Marche – Autorità di bacino regionale - Norme di Attuazione
- Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico dei bacini di rilievo regionale – Norme di Attuazione (elaborato d) – DCR n. 116 del 21/01/2004
- *Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale*, adottato il 17 dicembre 2015 con deliberazione n. 6 dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere e approvato il 3 marzo 2016, con deliberazione n. 9, dal Comitato Istituzionale ed il 27 ottobre 2016 dal Presidente del Consiglio dei Ministri con DPCM Pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 28 del 3 febbraio 2017 recante "approvazione del piano di gestione del rischio di alluvioni del distretto idrografico dell'Appennino Centrale".

## 2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

La “nuova” tratta ferroviaria *PM228 - Castelplanio* si sviluppa interamente in affiancamento al Fiume Esino attraversando quest’ultimo alla progr. 6+600 del Lotto 1 (*PM228 - Bivio Nord Albacina*), alle progr. 1+100, 4+650 e 6+100 del Lotto 2 (*Bivio Nord Albacina – Serra San Quirico*), alle progr. 3+050, 3+600 e 4+150 del Lotto 3 (*Serra San Quirico - Castelplanio*). Nella figura seguente è riportato il tracciato della linea ferroviaria in progetto, con evidenziata l’area di studio.

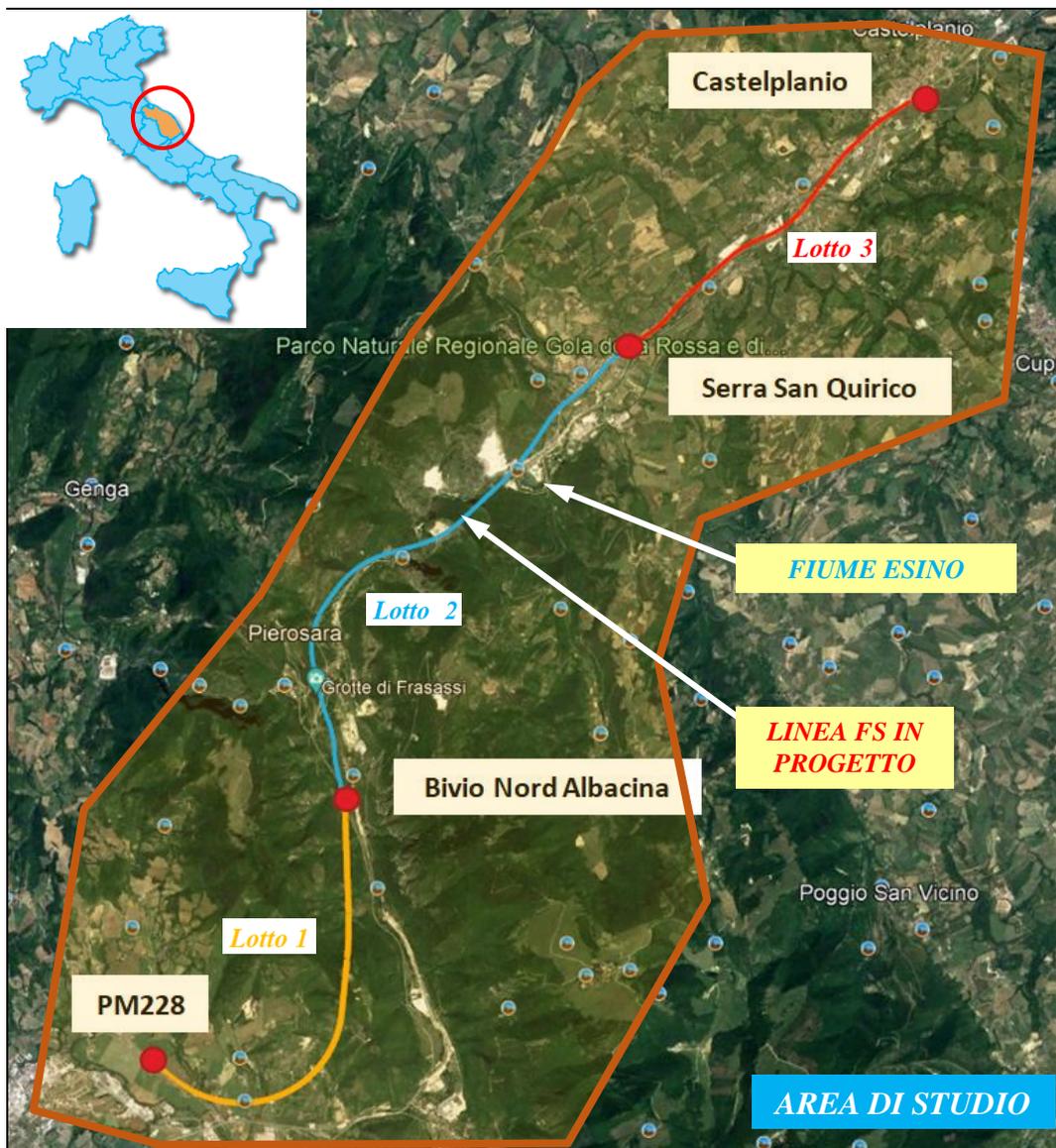


Fig. 1 – Inquadramento generale dell’area di studio.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA          RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO          PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A

### 3. IL BACINO IDROGRAFICO DEL FIUME ESINO

Il Fiume Esino è il principale corso d'acqua della Provincia di Ancona; il suo bacino imbrifero, che misura complessivamente 1.203 km<sup>2</sup>, rientra con una parte apprezzabile nella provincia di Macerata e solo marginalmente nelle province di Pesaro e Perugia.

Nasce dal monte Cafaggio (1.116 m) ad Esanatoglia (MC) e sfocia, dopo circa 75 km a Falconara Marittima in località Fiumesino.

Il Fiume Esino ha caratteristiche del tutto particolari; a monte è caratterizzato da un regime tipicamente torrentizio, a valle e fino alla foce assomiglia molto di più ad un classico fiume di pianura. Nel tratto fluviale di studio, i suoi principali affluenti sono il Torrente Giano (che confluisce nel F. Esino nei pressi di Albacina), il Torrente Sentino (che confluisce nel F. Esino nei pressi di Genga), il Torrente Esinante (che confluisce nel F. Esino nei pressi di Castelplanio).

Il sottobacino idrografico di interesse, con sezione di chiusura collocata nei pressi di Castelplanio ricopre un'area di 764 km<sup>2</sup> circa (Fig. 2). All'interno di quest'ultimo, sono stati inoltre individuati ulteriori sottobacini con sezione di chiusura in nodi ritenuti di interesse in relazione all'idrografia (i.e. principali confluenze) e allo sviluppo del tracciato ferroviario di progetto (i.e. attraversamenti fluviali).

Sulla base di tale suddivisione ed in analogia a precedenti studi condotti dalla Provincia di Ancona e dal Consorzio di Bonifica delle Marche (rif. *“Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico – Indagine condotta sui bacini idrografici dei fiumi Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti e Tenna”* Consorzio di Bonifica delle Marche in collaborazione con Università di Camerino; *“Manutenzione straordinaria biennale sui reticoli idrografici provinciali in aree P.A.I. a rischio R3 e R4. Bacino Idrografico Fiume Esino” - Programma Operativo Regionale (POR) – Obiettivo “Competitività Regionale ed Occupazione” Regione Marche 2007/2013 cofinanziato dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) – Asse 5 “Valorizzazione dei Territori” – Provincia di Ancona – Progetto Esecutivo*), è stato quindi sviluppato il modello idrologico del sottobacino del F. Esino in esame (come descritto nei capitoli successivi).

I dati morfometrici ( $A$  = estensione;  $L$  = lunghezza dell'asta principale;  $H_{max}$  = quota massima,  $H_{min}$  = quota minima;  $H_{med}$  = quota media;  $P_{asta}$  = pendenza media dell'asta principale) dei sottobacini individuati sono riportati in Tab. 1. Per maggiori dettagli, si rimanda comunque agli elaborati grafici annessi al presente studio.

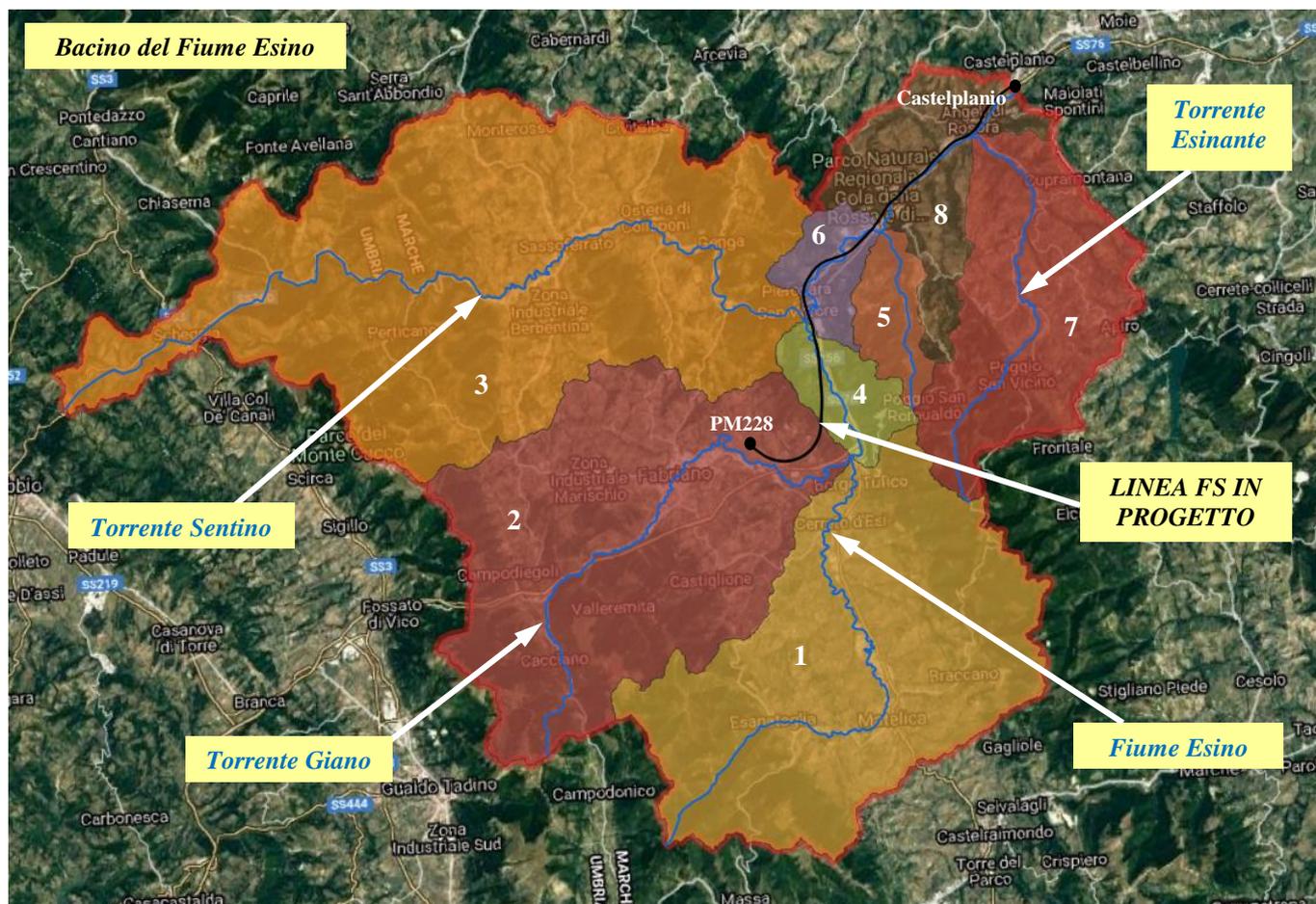


Fig. 2 – Bacino idrografico del Fiume Esino: sottobacini di interesse.

ID	Sottobacino	A (km <sup>2</sup> )	H <sub>max</sub> (m slm)	H <sub>min</sub> (m slm)	H <sub>med</sub> (m slm)	L (km)	P <sub>asta</sub> (%)
1	F. Esino (a monte confluenza T. Giano)	165	1670	230	550	30.05	2.8
2	T. Giano	167.4	1380	226	580	29.5	3.4
3	T. Sentino	261	1050	193	510	37.2	1.6
4	F. Esino (tra T. Giano e T. Sentino)	17.3	1030	190	617	7.1	10.3
5	Fosso della Grotta	15.3	1060	159	550	7.2	10.8
6	F. Esino (tra T. Sentino e F. Grotta)	14.8	870	158	454	7.03	4.4
7	T. Esinante	78.7	1470	138	430	20.3	4.9
8	F. Esino (tratto finale)	44.2	1090	120	490	13.2	4.7
-	F. Esino totale (a Castelplanio)	763.7	1670	120	660	55.42	4.4

Tab. 1 – Sottobacini di interesse del Fiume Esino: dati morfometrici.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA          RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO          PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A

### 3.1 Studi idrologici esistenti disponibili

A titolo di confronto e verifica delle analisi idrologiche sviluppate nell'ambito del presente progetto, descritte nel capitolo successivo, nelle tabelle seguenti si riportano i valori di portata al colmo, per specifici tempi di ritorno ( $Tr$ ) e in corrispondenza di particolari sezioni di chiusura o nodi idrologici, disponibili per il Fiume Esino, dedotti da studi condotti dalla Provincia di Ancona e dal Consorzio di Bonifica delle Marche (rif. "Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico – Indagine condotta sui bacini idrografici dei fiumi Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti e Tenna" Consorzio di Bonifica delle Marche in collaborazione con Università di Camerino; "Manutenzione straordinaria biennale sui reticoli idrografici provinciali in aree P.A.I. a rischio R3 e R4. Bacino Idrografico Fiume Esino" - Programma Operativo Regionale (POR) – Obiettivo "Competitività Regionale ed Occupazione" Regione Marche 2007/2013 cofinanziato dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) – Asse 5 "Valorizzazione dei Territori" – Provincia di Ancona – Progetto Esecutivo).

Nello specifico, con riferimento allo studio condotto dalla Provincia di Ancona, sono forniti/indicati i valori di portata al colmo del Fiume Esino, per un tempo di ritorno di 200 anni, in corrispondenza di Mergo (alla confluenza del Torrente Vallemani ovvero prima della confluenza del T. Esinante) e a Moie (ovvero 4 km a valle di Castelplanio).

Sottobacino	Portata ( $m^3/s$ ) – $Tr_{200}$
F. Esino a Mergo	997.53
F. Esino a Moie	1018.84

Tab. 2 – Fiume Esino: valori di portata al colmo, per un tempo di ritorno di 200 anni, a Moie e a Mergo.

Con riferimento invece allo studio condotto dal Consorzio di Bonifica delle Marche, sono forniti/indicati i valori di portata al colmo del Fiume Esino, per un tempo di ritorno di 50 anni, in corrispondenza delle confluenze del T. Sentino e del T. Esinante.

Nodo idrologico	Portata ( $m^3/s$ ) – $Tr_{50}$
Confluenza del T. Sentino	666.50
Confluenza del T. Esinante	772.30

Tab. 3 – Fiume Esino: valori di portata al colmo, per un tempo di ritorno di 50 anni, alla confluenza di T. Sentino e T. Esinante.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDROLOGICA</b></p>	<p>COMMESSA IR0F</p>	<p>LOTTO 00 R 09</p>	<p>CODIFICA RI</p>	<p>DOCUMENTO ID0001 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 11 di 50</p>

#### **4. STUDIO IDROLOGICO DEL BACINO DEL FIUME ESINO**

##### **4.1 Generalità**

L'analisi delle precipitazioni intense è stata eseguita mediante il confronto dei risultati derivanti dall'applicazione di due metodologie:

- procedura *Va.P.I.* "Rapporto regionale per i compartimenti di Bologna, Pisa, Roma e zona emiliana del bacino del Po";
- elaborazione statistica delle registrazioni pluviometriche disponibili per l'area di studio mediante il metodo di Gumbel.

Nello specifico, il metodo *Va.P.I.* si basa sull'impiego di piogge estreme regionalizzate nell'ambito degli studi del GNDCl (Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche) condotti tramite il modello probabilistico TCEV (Two - Component Extreme Value). I dati pluviometrici analizzati sono desunti dalle pubblicazioni del Servizio Idrografico Italiano (oggi SIMN) relative ai Compartimenti di Bologna, Pisa e Roma, e l'archivio dei dati pluviometrici, basato sulle citate pubblicazioni, è aggiornato agli anni '90.

L'elaborazione statistica mediante il metodo di Gumbel prende in esame le serie storiche dei dati di pioggia, aggiornate alle recenti registrazioni (fino al 2020), riferite alle stazioni pluviometriche di interesse, fornite dal Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche.

La scelta dei tempi di ritorno di riferimento per il calcolo delle altezze di pioggia, e quindi delle portate, di progetto è stata effettuata in conformità a quanto previsto nel Manuale di Progettazione Ferroviaria (RFI, 2020), nelle Norme Tecniche delle Costruzioni (D.M. 17 Gennaio 2018), e nella relativa circolare esplicativa n. 7 del 21 gennaio 2019 "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", nonché nella pianificazione di bacino vigente (i.e. *P.G.R.A.A.C.*, 2019).

In particolare, per i corsi d'acqua principali, quali il Fiume Esino, e la verifica di compatibilità idraulica delle relative opere di attraversamento, è il tempo di ritorno di progetto è fissato in 200 anni. Sono presi in considerazione anche i tempi di ritorno di 50 e 500 anni, in accordo alla definizione delle classi di pericolosità idraulica riportata nel *P.G.R.A.A.C.*.

	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IR0F	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A	FOGLIO 12 di 50

## 4.2 Metodologia Va.P.I. – Regione Marche

Per il territorio di competenza dei Compartimenti del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) di Bologna, di Pisa e di Roma non sono stati ancora pubblicati Rapporti Regionali specifici.

Ciononostante, sul territorio in questione sono stati eseguiti vari studi nel rispetto dei criteri del Progetto VAPI, ai differenti livelli della procedura gerarchica e per le differenti grandezze idrologiche, a cura dell'U.O. 1.31 (ENEL S.p.a. Unità di Idrologia di Mestre) e dell'U.O. 1.41 (DISTART Università di Bologna).

L'area di indagine, che comprende parte dell'Emilia-Romagna e l'intera regione Marche (SIMN Bologna), gran parte della regione Toscana (SIMN Pisa), l'intera regione Umbria e parte della regione Lazio (SIMN Roma), è stata inoltre recentemente estesa ad alcuni bacini idrografici di competenza dell'Ufficio Idrografico del Po di Parma, così da ricoprire totalmente la regione Emilia-Romagna.

Questi studi, integrati con ulteriori analisi attualmente in corso relativamente alla modellazione statistica degli eventi idrometrici massimi annuali osservati nei bacini idrografici compresi tra lo Scrivia (Emilia) ed il Tronto (Marche), costituiranno la base per la redazione del Rapporto Finale che sarà effettuato durante il prossimo triennio di attività del GNDCI, con coordinamento presso il DISTART dell'Università di Bologna a cura delle U.O. sopra menzionate e dell'U.O. attualmente in corso di istituzione presso la Facoltà di Ingegneria di Ferrara. In questa sede si cerca di sintetizzare i risultati salienti delle analisi prima menzionate, fornendone unicamente gli aspetti puramente operativi.

### 4.2.1. Va.Pi.: regionalizzazione delle piogge

L'area interessata dagli studi comprende i bacini idrografici affluenti in destra Po compresi tra lo Scrivia ed il Panaro (Ufficio Idrografico del Po di Parma), i bacini idrografici con foce in Adriatico compresi tra il fiume Reno ed il fiume Tronto (Compartimento SIMN di Bologna), nonché quelli con foce in Tirreno tra il Serchio e l'Albegna (Compartimento SIMN di Pisa) e tra il Marta a Nord ed il Tevere a Sud (Compartimento SIMN di Roma).

La rete pluviometrica cui si è fatto riferimento risulta composta da 1556 stazioni di misura con numerosità variabile da 1 a 72 anni, per 540 delle quali sono disponibili anche le osservazioni relative ai massimi annuali delle altezze di pioggia di durata inferiore al giorno, con numerosità variabile da 1 a 62 anni.

L'analisi statistica è stata condotta sulle stazioni con almeno 30 anni di osservazione, individuando così 792 stazioni di misura della precipitazione giornaliera (numerosità media campionaria 48 anni) e 240 delle piogge di durata 1-24 ore (numerosità media campionaria di 43 anni).

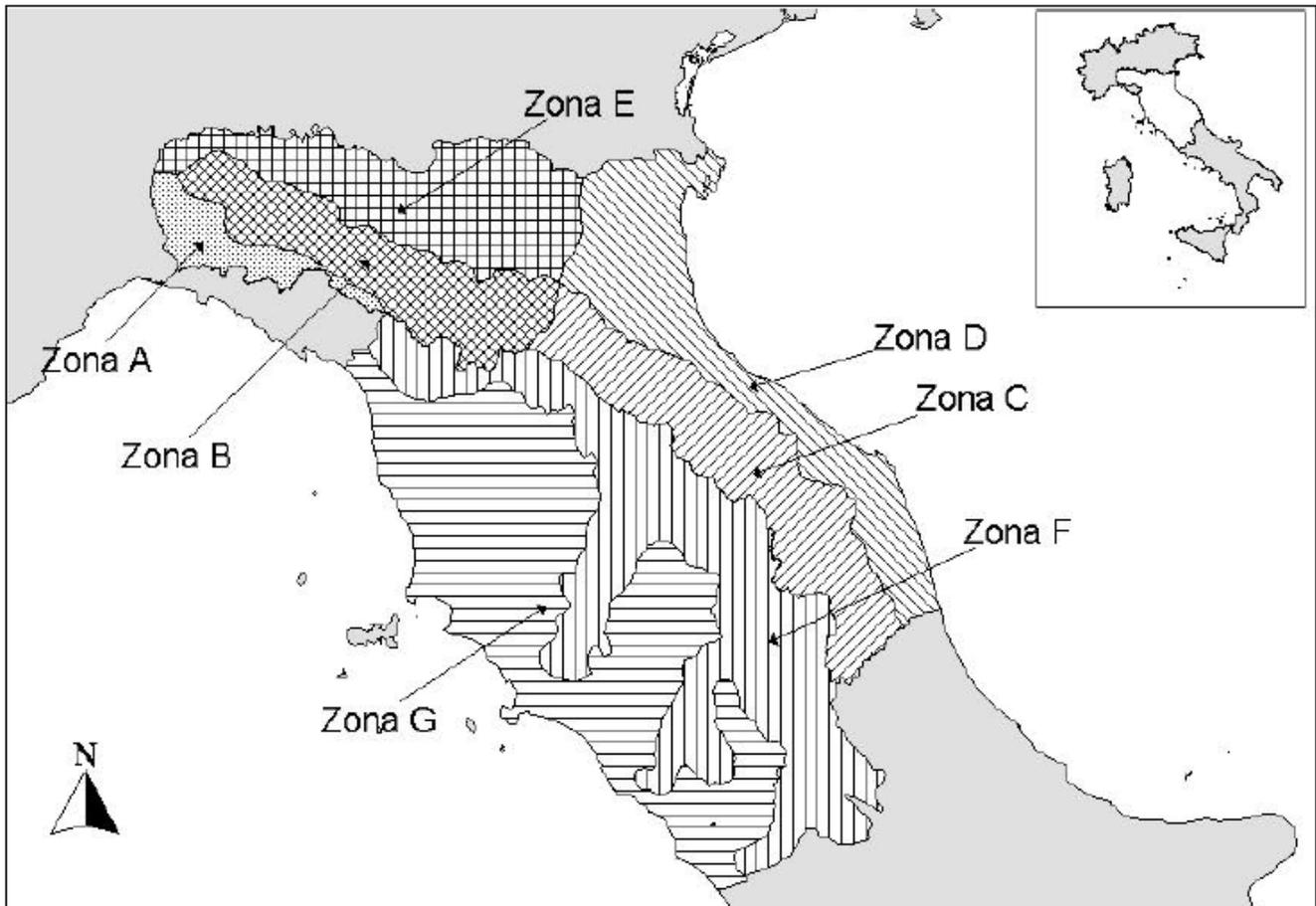
L'analisi pluviometrica inizialmente svolta da Franchini e Galeati [1994] in riferimento al compartimento SIMN di Bologna ha portato all'identificazione di 2 sotto zone omogenee (SZO), una zona costiera ed una zona appenninica, la cui omogeneità in senso statistico è stata confermata in un successivo studio da Brath et al. [1998]. Tale studio, come già precedentemente ricordato, si estende anche ai bacini idrografici di competenza dei SIMN di Pisa e Roma. Esso ha portato alla identificazione nell'ambito delle regioni Toscana, Umbria e Lazio di due ulteriori SZO: la prima include la zona tirrenica costiera e parte della vallata del Tevere, mentre la seconda i contrafforti appenninici lungo il versante tirrenico. Un più recente studio, che integra i precedenti dati pluviometrici con quelli relativi ai bacini idrografici in destra Po compresi tra lo Scrivia e il Panaro (cfr. Brath e Franchini, 1999), ha infine condotto ad una leggera modifica nella suddivisione delle 2 SZO omogenee individuate sul versante adriatico ed alla delimitazione di 3 ulteriori SZO nel territorio di competenza dell'Ufficio Idrografico del Po di Parma.

L'intero territorio indagato risulta in definitiva suddiviso in 7 SZO omogenee nei confronti delle precipitazioni intense, visualizzate nella figura seguente, le cui curve di crescita, che determinano in maniera univoca la relazione fra periodo di ritorno T e valore del coefficiente probabilistico di crescita  $K_T$ :

$$T = \frac{1}{1 - F_K(k)} = \frac{1}{1 - \exp(-\Lambda_1 e^{-\eta k} - \Lambda_* \Lambda_1^{1/\theta_*} e^{-\eta k/\theta_*})} \quad (*)$$

risultano completamente definite dai parametri riportati in tabella.

Sottozona	$\Lambda_*$	$\theta_*$	$\Lambda_1$	$\eta$
A	0.109	2.361	24.70	4.001
B	1.528	1.558	39.20	5.335
C	1.528	1.558	25.70	4.913
D	0.361	2.363	29.00	4.634
E	0.044	3.607	30.45	4.135
F	0.144	2.042	33.03	4.321
G	0.221	3.322	30.78	4.628



*Fig. 3 – Va.P.I.: compartimenti di Bologna, Pisa e Roma, sottozone omogenee.*

Per un agevole utilizzo operativo delle curve di crescita occorrerebbe disporre della forma inversa della precedente equazione (\*) tramite la quale, fissato il valore  $T$  del periodo di ritorno di interesse, ricavare il corrispondente valore del coefficiente di crescita  $K_T$ .

Poichè per la distribuzione TCEV tale relazione non è analiticamente ottenibile, nella tabella seguente sono riportati i valori di  $K_T$  ottenuti numericamente dalla (\*) per i valori del periodo di ritorno di maggior interesse pratico.

T (anni)	2	5	10	20	25	40	50	100	200	500	1000
SZO A	0.93	1.24	1.46	1.70	1.78	1.95	2.04	2.34	2.68	3.18	3.57
SZO B	1.01	1.30	1.51	1.71	1.77	1.90	1.97	2.17	2.37	2.63	2.83
SZO C	1.01	1.33	1.55	1.77	1.84	1.98	2.05	2.27	2.48	2.77	2.99
SZO D	0.87	1.19	1.44	1.72	1.82	2.02	2.13	2.45	2.79	3.23	3.57
SZO E	0.93	1.22	1.43	1.64	1.72	1.89	1.98	2.32	2.78	3.53	4.13
SZO F	0.93	1.23	1.43	1.65	1.72	1.87	1.95	2.20	2.47	2.86	3.17
SZO G	0.88	1.22	1.50	1.87	2.01	2.32	2.47	2.96	3.46	4.12	4.61

Nelle pratiche approssimazioni, è possibile anche fare riferimento ad una espressione semplificata del tipo:

$$K_T = \left( \frac{\theta_* \text{Ln } \Lambda_*}{\eta} + \frac{\text{Ln } \Lambda_1}{\eta} \right) + \frac{\theta_*}{\eta} \text{Ln } T$$

che, sostituendo gli opportuni valori dei parametri, conduce alle seguenti espressioni approssimanti, il cui uso comporta comunque per periodi di ritorno superiori a 50 anni errori sempre inferiori al 10%:

$$\text{SZO A: } K_T = -0.5064 + 0.590 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO B: } K_T = 0.8115 + 0.292 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO C: } K_T = 0.7952 + 0.317 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO D: } K_T = 0.2071 + 0.510 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO E: } K_T = -1.8986 + 0.872 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO F: } K_T = -0.1064 + 0.473 \text{Ln } T$$

$$\text{SZO G: } K_T = 0.3431 + 0.718 \text{Ln } T$$

Le analisi dei massimi annuali delle piogge brevi (1-24 ore) rilevati alle 240 stazioni di misura disponibili hanno evidenziato che l'ipotesi solitamente assunta di un fattore probabilistico di crescita  $K_T$  costante al variare della durata di pioggia non risulta soddisfatto in 5 delle 7 SZO.

Basandosi sia su risultati di carattere statistico sia su considerazioni legate alla applicabilità, quali limitare il numero di parametri di stima e porsi comunque, nei casi incerti, in condizioni conservative, in queste 5 SZO sono stati stimati, per le diverse durate, tutti o alcuni dei parametri descrittivi delle relative curve di crescita. I parametri ottenuti sono riportati nella tabella seguente.

Sottozona	$\Lambda^*$	$\theta^*$	$\Lambda_1$	$\eta$	durata (ore)		
A	0.109	2.361	24.70	4.001	Tutte		
B	1.528	1.558	13.65	4.280	1		
			19.35	4.629	3		
			26.20	4.932	6		
			39.20	5.335	≥12 e 1g		
C	1.528	1.558	13.65	4.280	1		
			14.70	4.354	3		
			20.25	4.674	6		
			25.70	4.913	≥12 e 1g		
D	0.361	2.363	29.00	4.634	Tutte		
E	0.044	3.607	13.60	3.329	1		
			19.80	3.704	3		
			23.65	3.882	6		
			30.45	4.135	≥ 12 e 1g		
F	0.073	1.406	21.01	3.713	1		
	0.144	2.042	33.03	4.321	≥ 3 e 1g		
G	0.131	1.820	16.28	3.571	1		
			0.770	2.391	24.71	5.140	3
			0.380	2.592	26.21	4.633	6
			0.303	2.799	30.01	4.680	12
			0.221	3.322	30.78	4.628	24 e 1g

La stima dei corrispondenti valori di  $K_T$  può essere dedotta dalla (\*) oppure mediante le espressioni approssimanti (sopra introdotte) caratterizzate da un errore di stima inferiore al 10% per  $T$  maggiore di 50 anni.

Per ottenere il valore della precipitazione indice di durata  $d$  cui fare riferimento per calcolare il valore della precipitazione di assegnata durata e tempo di ritorno per la regione in esame si propone l'utilizzo di una formulazione analoga alla classica curva di possibilità climatica del tipo:

$$m(h_d) = m(h_1) \cdot d^n$$

$$n = (\text{Ln}[m(h_g)] - \text{Ln}[m(h_1)] - \text{Ln } r) / \text{Ln } 24$$

in cui:

- $m(h_d)$  = media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione di durata  $d$  (ore);
- $m(h_g)$  = media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione giornaliera;
- $m(h_1)$  = media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione in 1 ora;
- $r = m(h_g) / m(h_{24}) = 0.89$  nella regione esaminata.

Per una pratica applicazione della curva di possibilità climatica vengono fornite le mappe isoparametriche di  $m(h_1)$  e di  $m(h_g)$  per l'intero territorio di indagine (vedi Brath e Franchini [1999] per le SZO A, B, C, D, E, e Brath et al. [1998] per le SZO G e F).

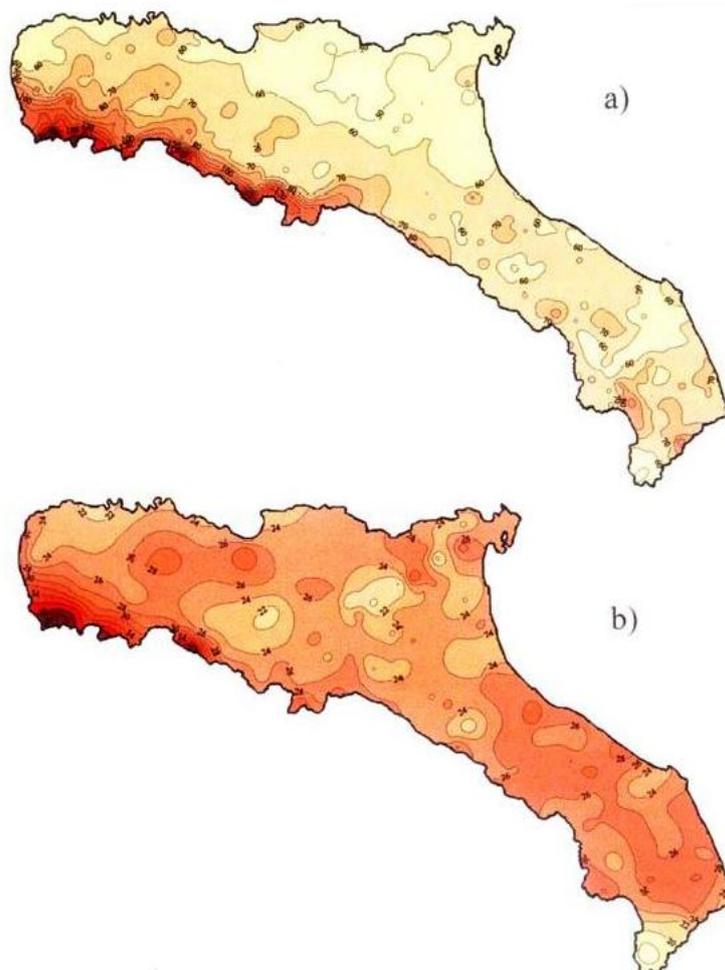


Fig. 4 – Isolinee delle altezze medie di pioggia massime annuali della durata di 1 giorno (a) e 1 ora (b).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA          RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO          PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A

La stima dell'altezza di precipitazione puntuale di durata  $d$  e tempo di ritorno  $T$  si ottiene moltiplicando il fattore di crescita opportuno per la precipitazione indice deducibile tramite la curva di possibilità climatica.

Per il sottobacino (totale) del Fiume Esino di interesse, ricadente nella "zona omogenea C", sono stati stimati valori dei parametri  $m(h_1)$  e  $m(h_g)$  pari rispettivamente a 25 e 60.

La tabella seguente riporta i valori calcolati per i parametri  $a$  e  $n$  delle leggi di pioggia per i diversi tempi di ritorno di riferimento considerati.

<b><math>Tr</math> (anni)</b>	<b>50</b>	<b>200</b>	<b>500</b>
<b><math>a</math></b>	51.3	62.0	69.3
<b><math>n</math></b>	0.312	0.312	0.312

Tab. 4 – Va.P.I.: valori dei parametri  $a$  e  $n$  della curva di possibilità climatica, per il sottobacino di interesse del Fiume Esino.

### 4.3 Elaborazione statistica delle registrazioni pluviometriche

Sono prese in considerazione le registrazioni pluviometriche presso le stazioni di misura mostrate nella tabella e nella figura seguenti, di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino di interesse.

<b>Stazione</b>	<b>Periodo di osservazione</b>	<b># osservazioni</b>
Arcevia	1939-2020	82
Campodiegoli	1990-2020	31
Cantiano	1949-2020	72
Cingoli	1947-2020	68
Cupramontana	1991-2020	30
Esanatoglia	2001-2020	20
Fabriano	1935-2020	82
Fonte Avellana	1991-2020	29
Moie	1935-2020	86
Pioraco	1935-2020	82
San Giovanni	2001-2020	20
Sassoferrato	1991-2020	30
Serralta	1991-2020	28

Tab. 5 – Stazioni pluviometriche di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino di interesse.

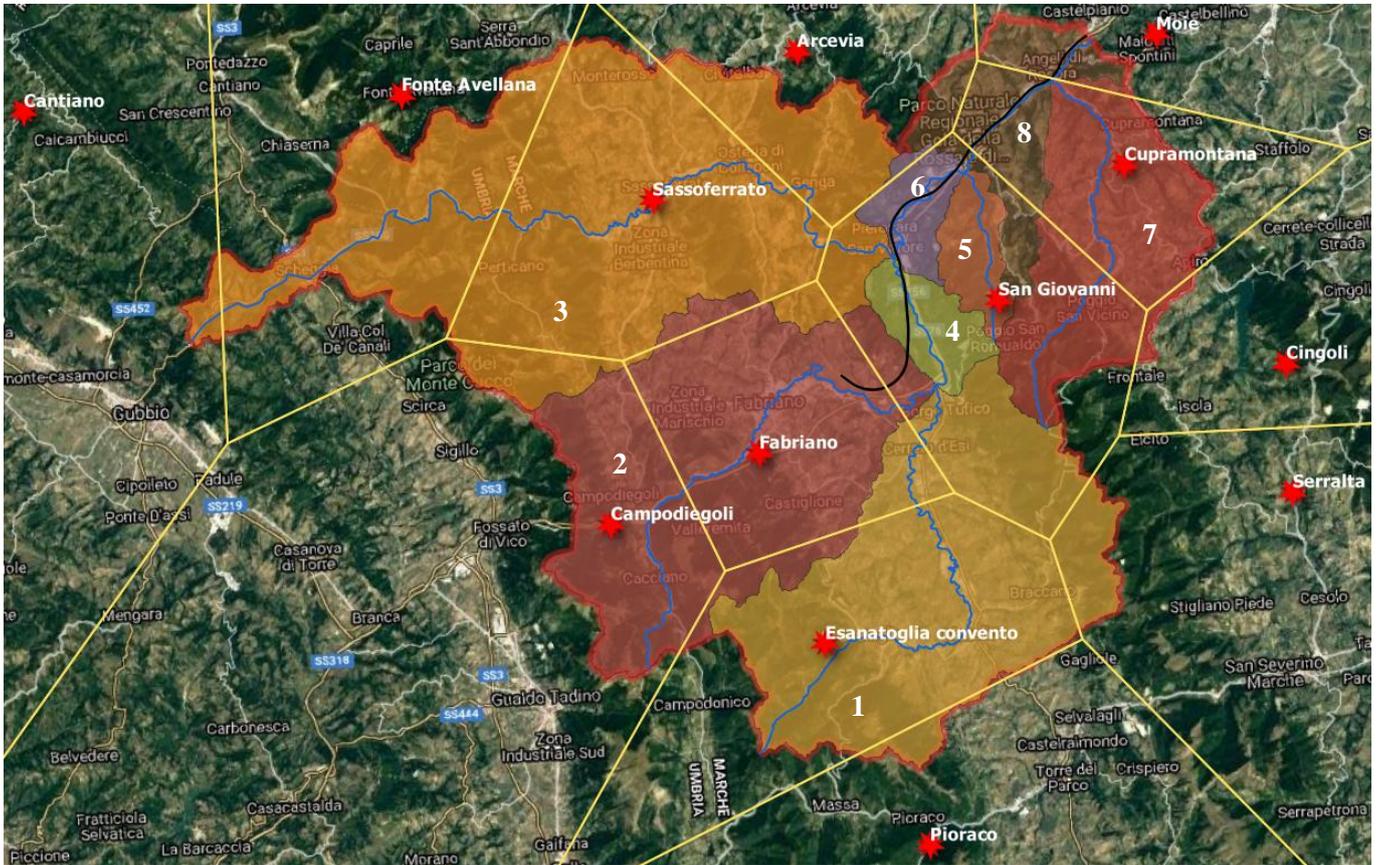


Fig. 5 – Stazioni pluviometriche (e relativi topoi) di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino di interesse.

Si è proceduto quindi all'elaborazione statistica delle serie storiche di altezza di pioggia per 1, 3, 6, 12, 24 ore, registrate e disponibili presso le stazioni di misura sopra individuate, secondo il modello di Gumbel. Tale metodo prevede l'applicazione della distribuzione doppio-esponenziale al campione di dati di precipitazione, intesi come variabili indipendenti.

Nello specifico, la funzione di probabilità cumulata che la definisce è:

$$F(x) = P(X \leq x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}}$$

Introducendo la variabile ridotta y:

$$y = \alpha(x - u)$$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA          RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO          PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A

si ha la forma canonica:

$$F(y) = e^{-e^{-y}}$$

I parametri  $\alpha$  e  $u$  sono legati alla media e alla varianza della popolazione. Sfruttando le informazioni contenute nel campione a disposizione si procede alla loro stima seguendo diversi metodi. Si otterranno parametri diversi per ogni durata di precipitazione.

Per una data durata di precipitazione, si ordinano le  $N$  altezze di precipitazione in ordine crescente e si numerano da 1 ad  $N$ . Ad ogni altezza di precipitazione si associa la relativa frequenza cumulata di non superamento, calcolata con la formula di Weibull:

$$F_i = \frac{i}{N+1}$$

A denominatore si ha  $N+1$  in luogo di  $N$  per evitare che il più grande evento verificatosi sia caratterizzato da una frequenza cumulata di non superamento pari a 1: valore che rappresenta l'evento impossibile da superare. Il metodo di Gumbel per la stima dei parametri della distribuzione si basa sull'ipotesi di confondere la probabilità di non superamento di una certa altezza di precipitazione (relativa ad una popolazione) con la sua frequenza cumulata di non superamento (che si riferisce, invece ad un campione della popolazione suddetta), cioè:

$$F(h_i) \cong F_i$$

La variabile ridotta da associare ad ogni altezza di precipitazione viene quindi calcolata come:

$$F(h_i) = F_i = F(y) = e^{-e^{-y}} \quad \text{e} \quad F_i = \frac{i}{N+1} \Rightarrow y_i = -\ln \left[ -\ln \left( \frac{i}{N+1} \right) \right]$$

Con questa assunzione, la variabile ridotta  $y$  dipende soltanto da  $h$  (= precipitazione) secondo la relazione lineare:

$$y = \alpha(h - u)$$

La stima dei parametri  $\alpha$  e  $u$  si ottiene sfruttando il metodo dei momenti, in base al quale i parametri della distribuzione vengono ottenuti eguagliando la media campionaria alla media della distribuzione della popolazione. Si ottengono quindi per  $\alpha$  e  $u$  le seguenti espressioni:

$$\alpha = \frac{1.283}{S_h} \quad u = m_h - \frac{0.577}{\alpha}$$

Richiamando il concetto di tempo di ritorno,  $T_r$ , cioè il tempo che mediamente trascorre tra la realizzazione di un evento e di un altro di entità uguale o superiore, si riesce ad ottenere l'espressione che esprime le altezze di precipitazione in funzione del tempo di ritorno:

$$T_r(h) = \frac{1}{1 - F(h)} \Rightarrow F(h) = \frac{T_r - 1}{T_r}$$

$$e^{-e^{-\alpha(h-u)}} = \frac{T_r - 1}{T_r} \Rightarrow h = u - \frac{1}{\alpha} \ln \left[ -\ln \left( \frac{T_r - 1}{T_r} \right) \right]$$

E' stata quindi ricavata l'espressione analitica della funzione  $h(T_r, \tau)$  che fornisce il valore di precipitazione ( $h$ ) in funzione del tempo di ritorno per una prefissata durata di precipitazione. Si vuole ora trovare un'espressione analitica che, per un dato tempo di ritorno, fornisca l'altezza di precipitazione in funzione della durata. A questo scopo, si assegna alla funzione  $h(T_r, \tau)$  la seguente forma:

$$h(T_r, \tau) = a(T_r) \tau^n$$

Queste equazioni, una per ogni prefissato tempo di ritorno, sono dette curve di possibilità pluviometrica (o climatica). L'intensità di precipitazione  $j(T_r, \tau)$  è definita come l'altezza di precipitazione per unità di tempo ed ha la forma:

$$j(T_r, \tau) = \frac{h(T_r, \tau)}{\tau} = a \tau^{n-1}$$

Passando alla notazione logaritmica, l'equazione della curva di possibilità pluviometrica assume la forma lineare, e viene ottenuta interpolando i valori per regressione lineare ai minimi quadrati. Gli scarti da minimizzare sono quelli verticali, in quanto la misura di  $h$  soffre di maggiori incertezze rispetto a quella del tempo di precipitazione.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA          RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO          PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A

$$\log h = \log a + n \log \tau$$

Nelle tabelle seguenti, sono dunque riportati i valori  $a$  e  $n$  (per durate di pioggia superiori all'ora), relativamente alle stazioni di misura considerate, per i tempi di ritorno ( $Tr$ ) di riferimento adottati.

Stazione	$a(50)$	$n(50)$	$a(200)$	$n(200)$	$a(500)$	$n(500)$
Arcevia	47.5	0.273	57.21	0.267	63.6	0.264
Campodiegoli	48.6	0.309	57.28	0.311	63.0	0.312
Cantiano	47.6	0.372	56.85	0.371	62.9	0.371
Cingoli	54.5	0.287	65.88	0.286	73.4	0.286
Cupramontana	54.6	0.25	67.31	0.239	75.7	0.234
Esanatoglia	49.7	0.207	59.98	0.193	66.7	0.186
Fabriano	52.4	0.246	63.67	0.244	71.1	0.243
Fonte Avellana	61.7	0.309	74.80	0.301	83.4	0.298
Moie	46.8	0.318	55.95	0.321	61.9	0.322
Pioraco	45.5	0.332	54.38	0.335	60.2	0.337
San Giovanni	51.1	0.361	60.90	0.367	67.4	0.369
Sassoferrato	69.9	0.28	88.50	0.274	100.8	0.271
Serralta	66.1	0.22	82.41	0.203	93.2	0.195

Tab. 6 – Stazioni pluviometriche di riferimento: valori dei parametri  $a$  e  $n$ .

Con riferimento ai vari sottobacini del Fiume Esino individuati, l'altezza di pioggia (ragguagliata all'area del singolo sottobacino) può essere valutata mediante l'applicazione del metodo dei poligoni di Thiessen (o dei topoi). In particolare, il volume di pioggia ( $V_p$ ) caduto all'interno di un poligono di Thiessen o topoi è uguale all'altezza di precipitazione misurata nella relativa stazione pluviometrica per l'area del poligono. Il volume di pioggia caduto sull'intero bacino sarà quindi fornito dalla somma dei prodotti di cui prima con l'avvertenza che, per quei topoi che parzialmente ricadono fuori dalla regione in esame, si dovrà considerare solo l'area della porzione del poligono o del topoi che appartiene al bacino:

$$V_p = \sum_{i=1}^N h_i (\Omega_i \cap S)$$

in cui  $i$  è il generico topoi/poligono di Thiessen;  $N$ , il numero dei topoi;  $h_i$ , l'altezza di pioggia misurata nella stazione;  $\Omega_i$  è l'area del topoi;  $S$ , la superficie del bacino. Quindi, l'altezza di pioggia ( $h$ ) ragguagliata all'area può essere dedotta come  $h = V_p/S$ .

#### 4.4 Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica disponibili per l'area di studio

Di seguito, si riporta il confronto tra le curve di possibilità pluviometrica (CPP), per un tempo di ritorno di 200 anni, ricavate dall'applicazione della metodologia Va.P.I. – Regione Marche ed elaborate per le stazioni pluviometriche di riferimento, come precedentemente descritto.

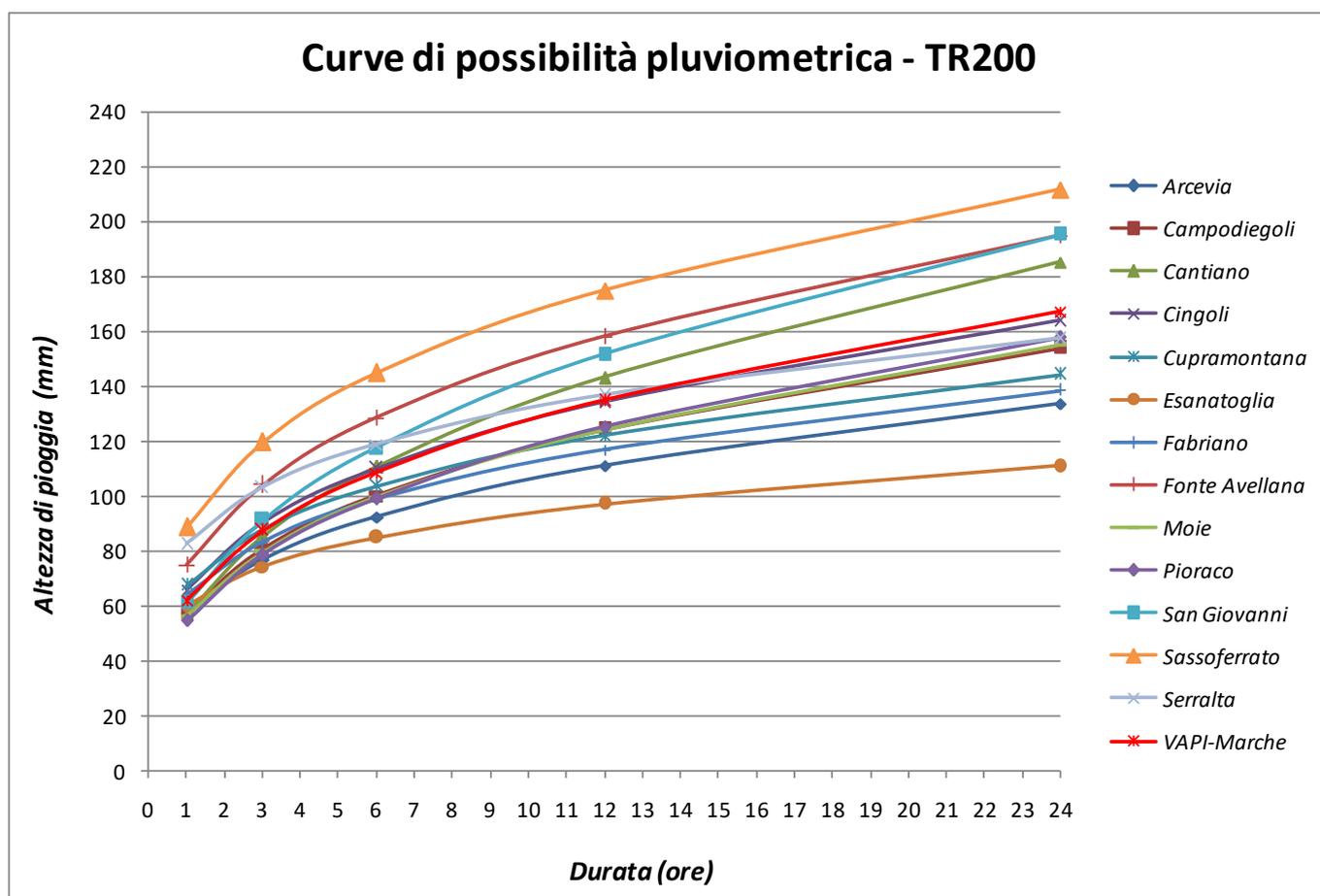


Fig. 6 – Confronto tra le curve di possibilità pluviometrica ( $Tr = 200$  anni) ricavate dalle differenti metodologie adottate.

Si osserva che la CPP derivante dall'applicazione della metodologia Va.P.I. fornisce valori di precipitazione superiori rispetto a quelli forniti dalle CPP relative alle stazioni pluviometriche considerate, eccetto per le stazioni di Sassoferrato, Fonte Avellana, San Giovanni, Cantiano e Serralta (per durate inferiori a 12 ore) che restituiscono invece valori di precipitazione superiori e più cautelativi della metodologia Va.P.I. – Regione Marche.

#### 4.5 Eventi pluviometrici e alluvionali progressi nell'area di intervento

Nel presente paragrafo si riporta la descrizione degli eventi pluviometrici/alluvionali più significativi, verificatesi negli ultimi anni nell'area di intervento, presi come riferimento per la calibrazione del modello idrologico sviluppato, descritto nei paragrafi successivi.

Tra questi, di rilievo l'**evento del 10-13 novembre 2013**, con precipitazioni importanti che hanno interessato l'intero territorio regionale delle Marche.

Nella prima parte, dalla tarda serata di domenica fino alle ore centrali di lunedì 11 la zona maggiormente colpita è stata quella centrosettentrionale, poi, dal pomeriggio del lunedì fino a mercoledì 13, le precipitazioni sono state particolarmente persistenti nella restante porzione di territorio.

I venti forti, soprattutto nella giornata dell'11, hanno causato mareggiate lungo tutta la fascia costiera, causando l'abbattimento di numerosi alberi, l'interruzione di diverse tratte di linea elettrica e rendendo, inoltre, più difficile il naturale deflusso delle acque fluviali a mare.

Situazioni di criticità si sono verificate in tutta la regione. Per quanto riguarda la Provincia di Ancona, il Fiume Esino è andato in crisi, esondando non solo nella porzione montana del bacino (Fabriano, Genga, Serra San Quirico, Cerreto d'Esi, sia lungo l'asta principale che nel reticolo minore) ma anche nel tratto finale, a Chiaravalle e a Falconara, dove è uscito per l'erosione di un argine.

Anche nell'anconetano si sono verificate numerose frane, soprattutto nella porzione alto-collinare e montana, che hanno determinato diverse e importanti situazioni di criticità, sia nella viabilità stradale (chiusura SS 76, chiusura vecchia statale a Gola della Rossa, SP 15 nel tratto Villa Pera-Genga) che ferroviaria (circolazione ridotta ad un solo binario in numerosi punti).

Di seguito si riportano gli ietogrammi orari registrati durante l'evento **del 10-13 novembre 2013** presso le stazioni pluviometriche di riferimento per l'area di studio (fonte: Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche), applicati successivamente nel modello idrologico ai fini della relativa calibrazione.

**RELAZIONE IDROLOGICA**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	A	25 di 50

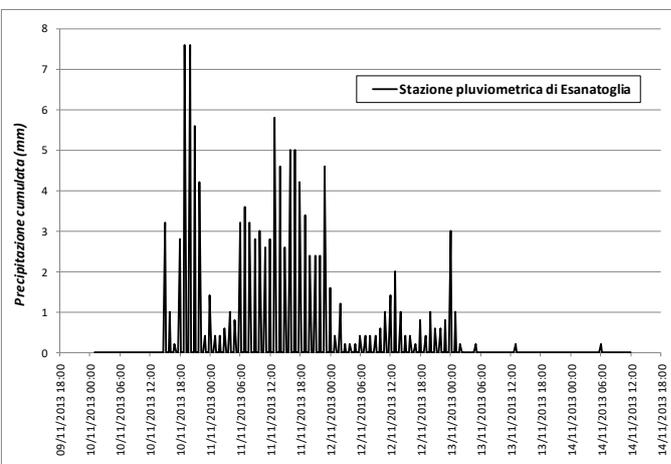
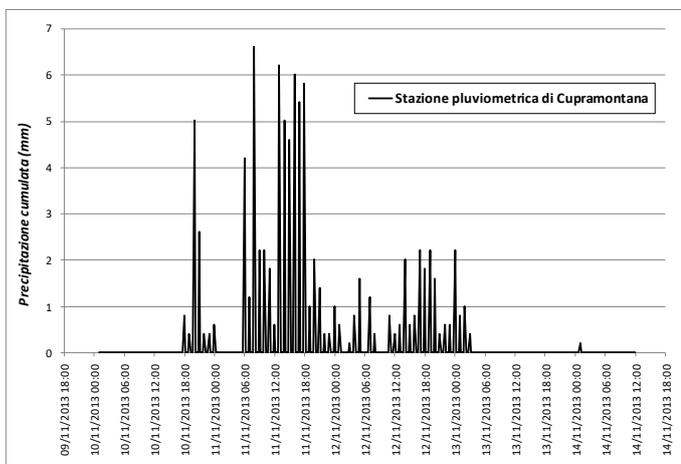
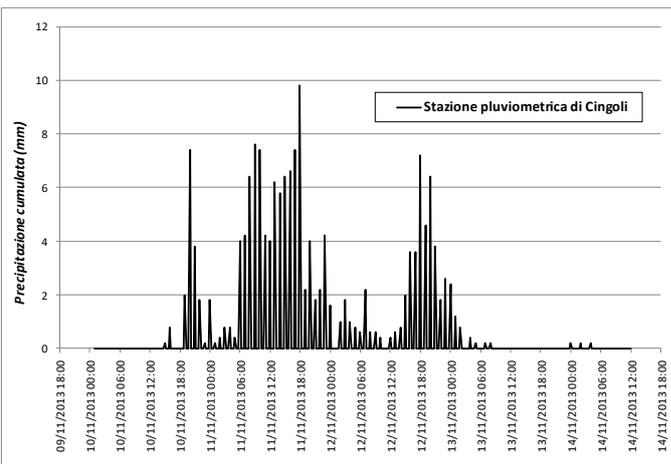
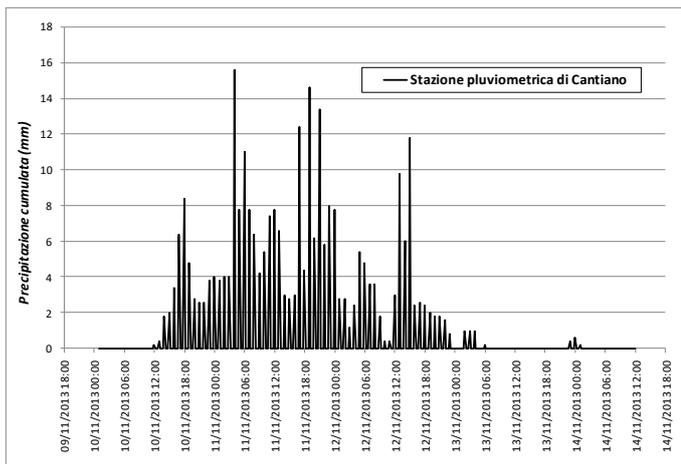
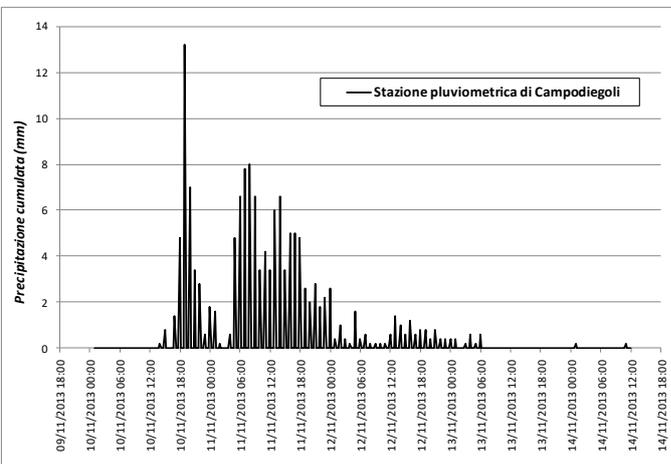
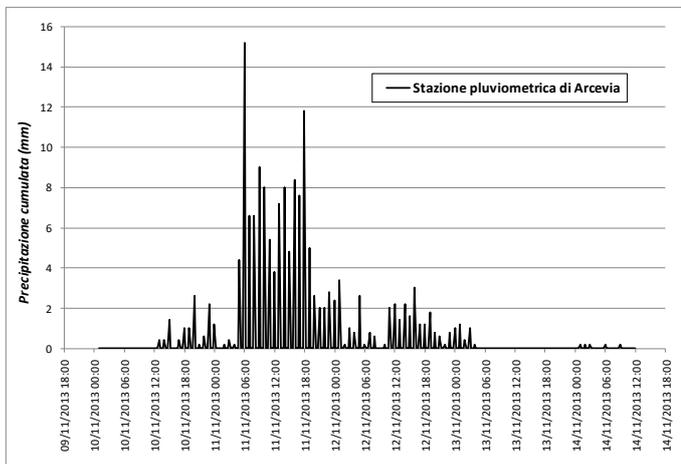


Fig. 7 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Arcevia, Campodiegoli, Cantiano, Cingoli, Cupramontana, Esanatoglia.

**RELAZIONE IDROLOGICA**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	A	26 di 50

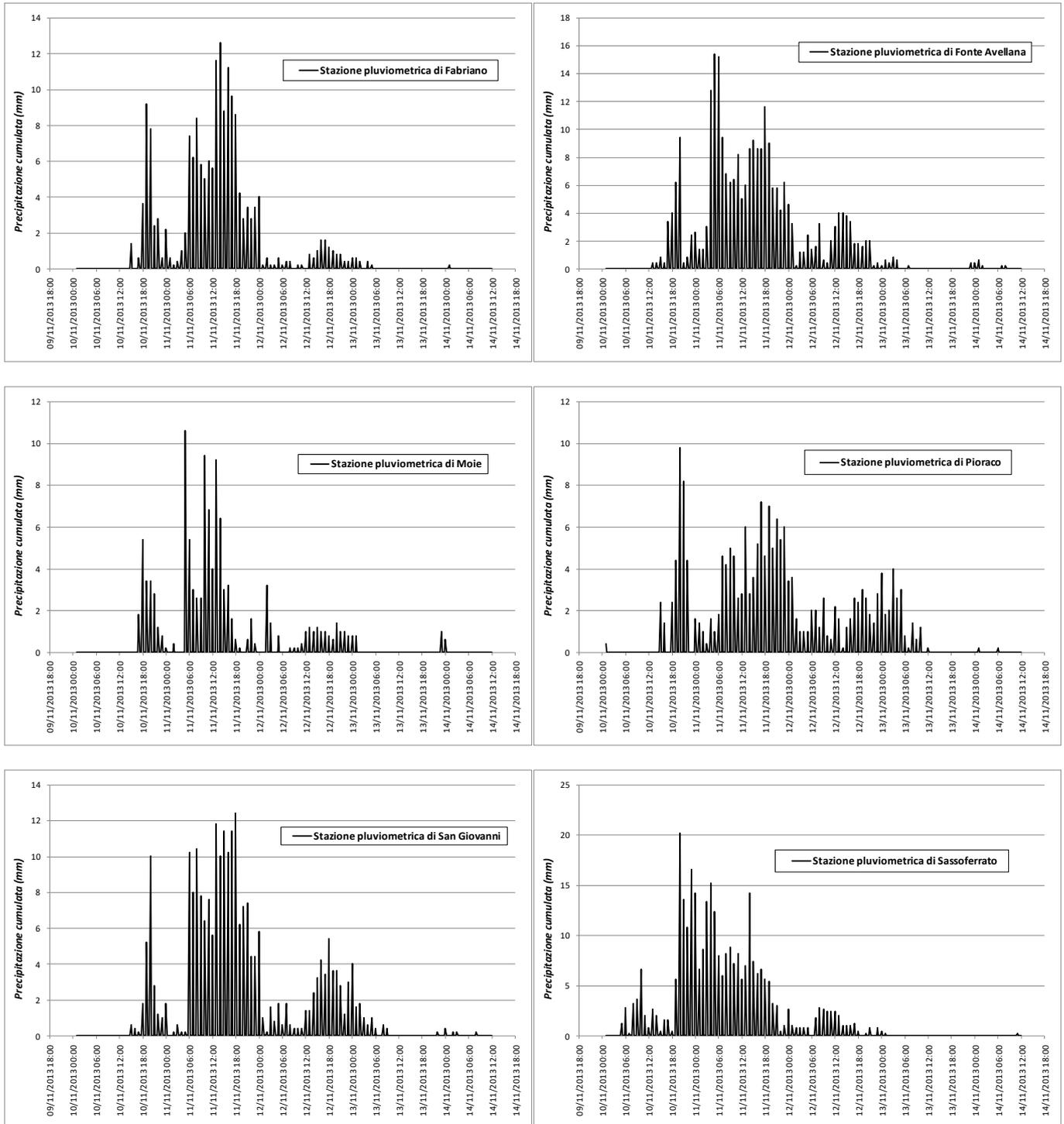


Fig. 8 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Fabriano, Fonte Avellana, Moie, Pioraco, San Giovanni, Sassoferrato.

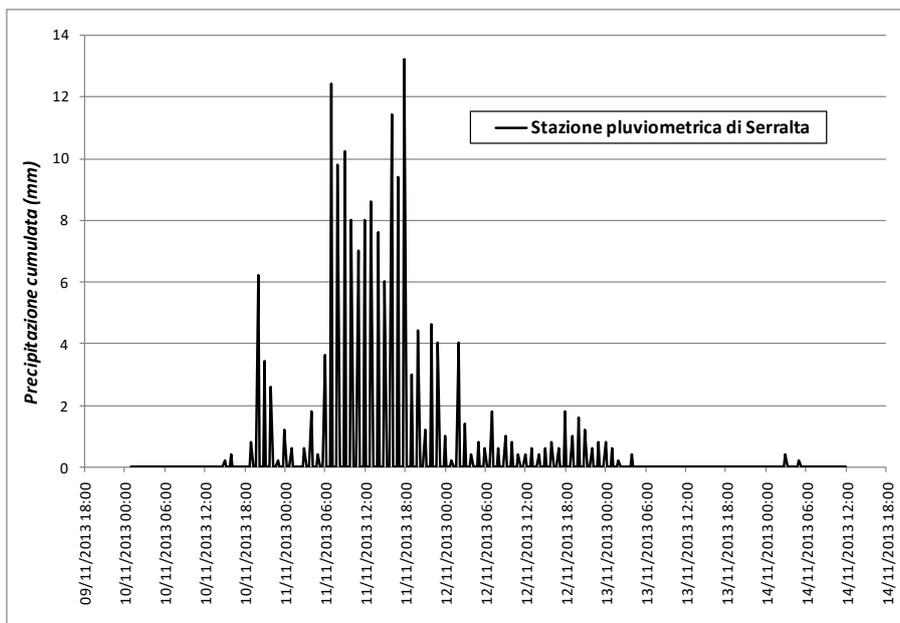


Fig. 9 – Evento del 10-13 novembre 2013: ietogrammi orari registrati presso la stazione pluviometrica di Serralta.

Altro evento significativo, sebbene di minore entità rispetto a quello del 2013, è quello verificatosi il 6-8 marzo 2017, preso anch' esso in considerazione nell'ambito della calibrazione del modello idrologico del bacino del Fiume Esino sviluppato.

Di seguito, si riportano gli ietogrammi orari registrati durante l'evento **del 6-8 marzo 2017** presso le stazioni pluviometriche di riferimento per l'area di studio (fonte: Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche), successivamente applicati.

**RELAZIONE IDROLOGICA**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	A	28 di 50

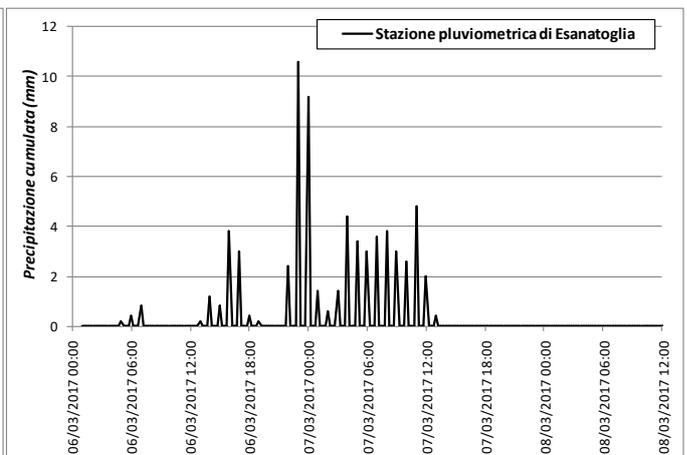
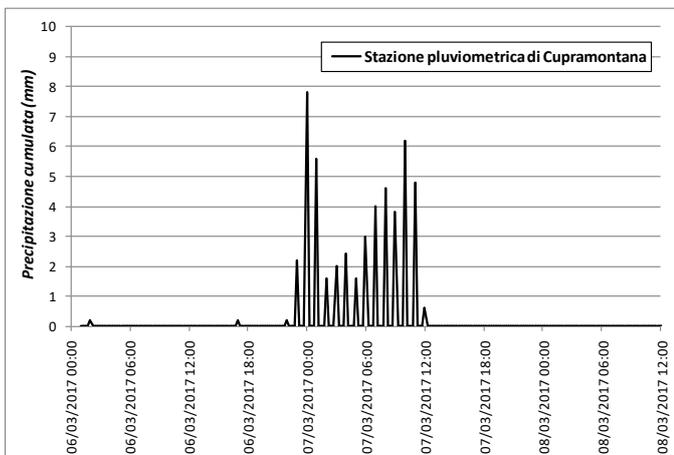
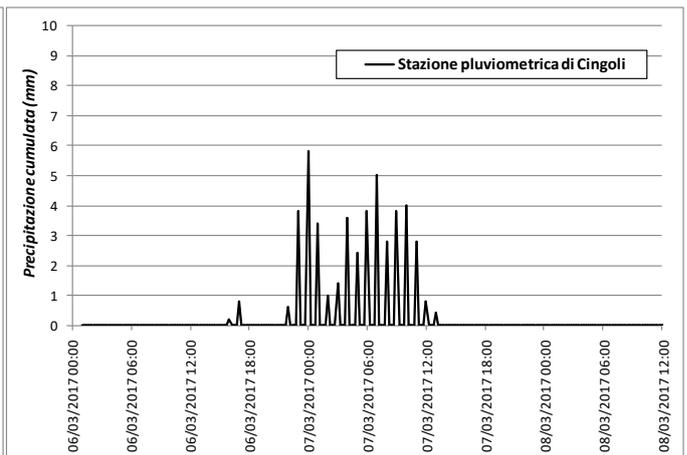
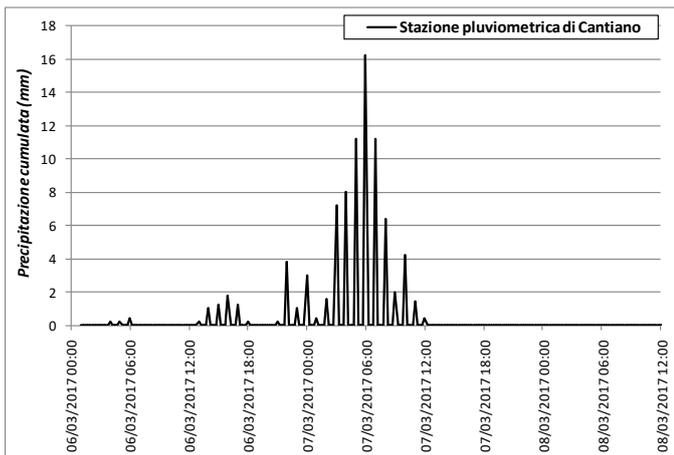
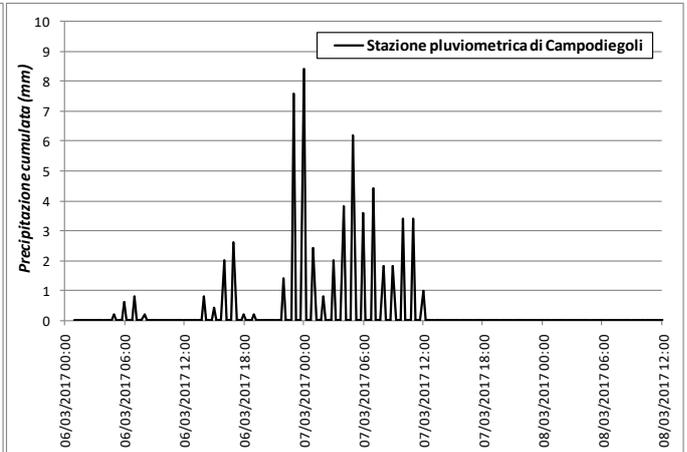
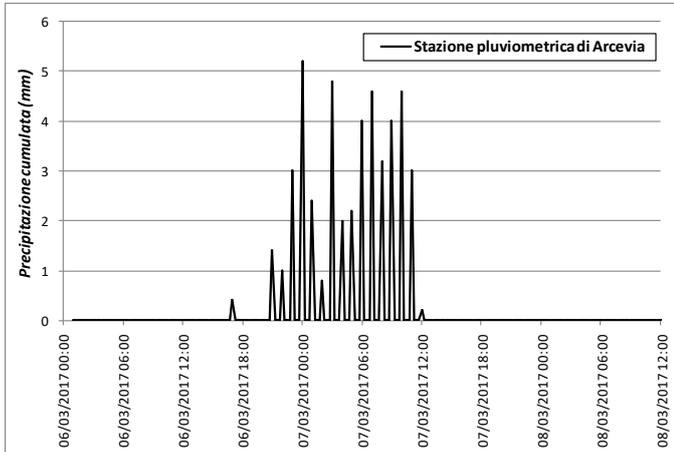


Fig. 10 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Arcevia, Campodiegoli, Cantiano, Cingoli, Cupramontana, Esanatoglia.

**RELAZIONE IDROLOGICA**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0001 001	A	29 di 50

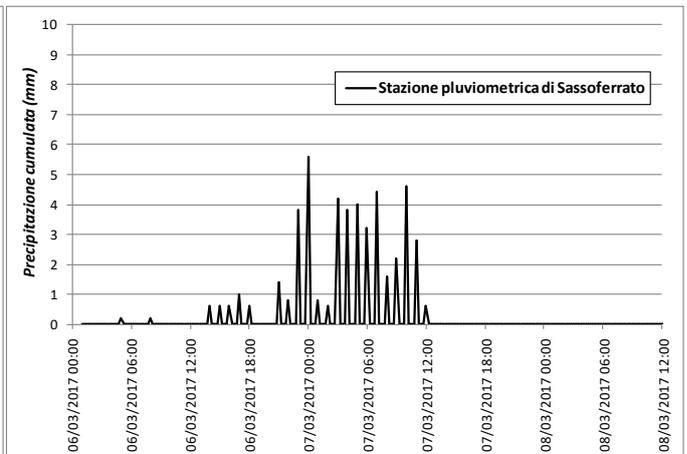
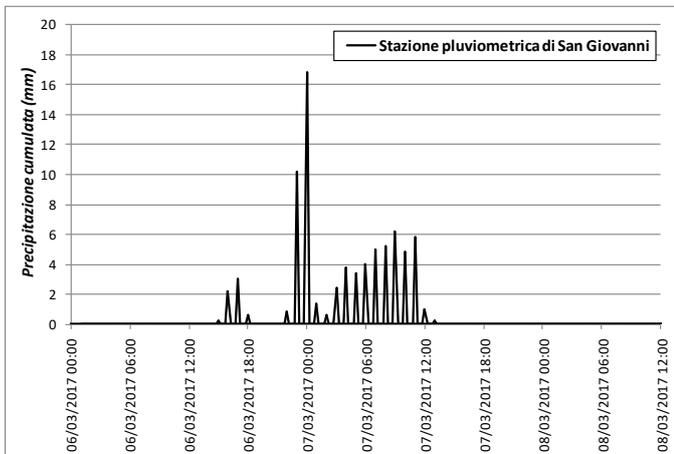
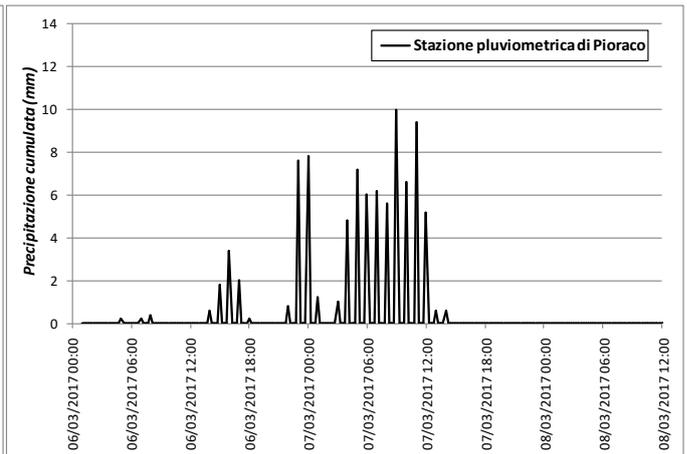
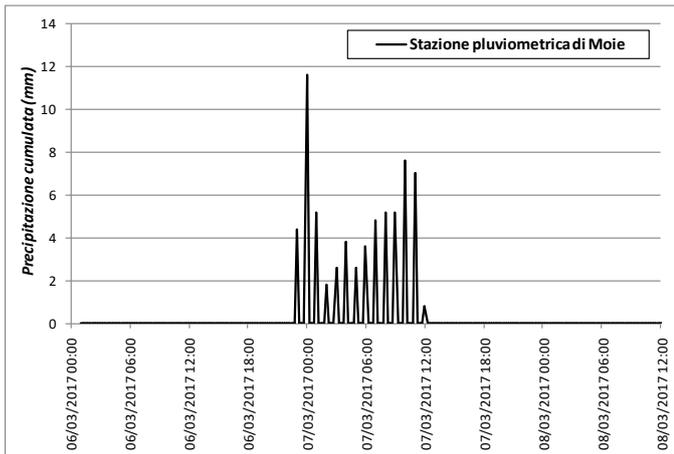
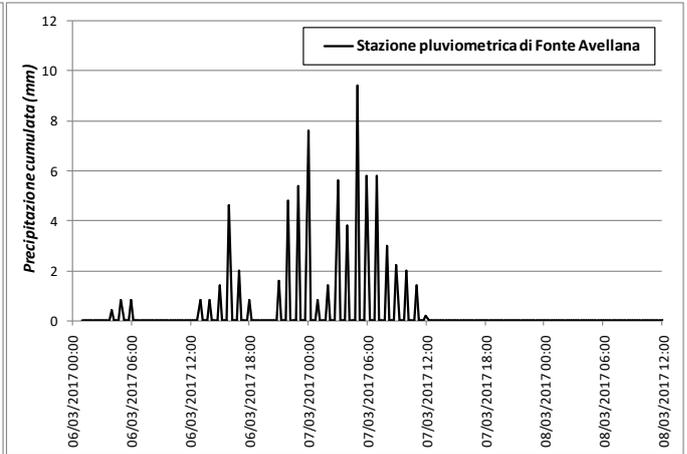
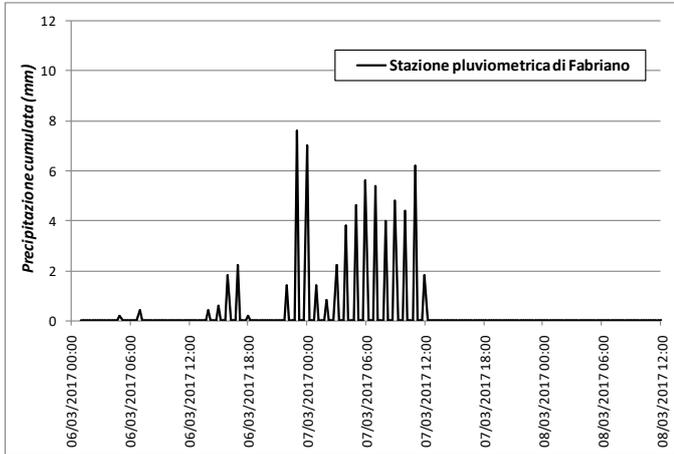


Fig. 11 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso le stazioni pluviometriche di Fabriano, Fonte Avellana, Moie, Pioraco, San Giovanni, Sassoferrato.

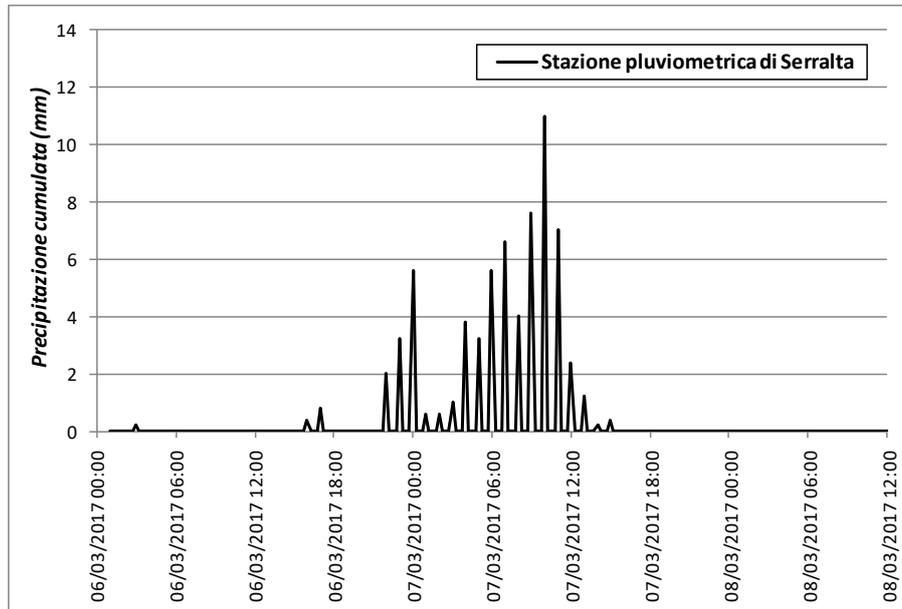


Fig. 12 – Evento del 6-8 marzo 2017: ietogrammi orari registrati presso la stazione pluviometrica di Serralta.

#### 4.6 Modello idrologico del bacino del Fiume Esino

Il modello idrologico del bacino del Fiume Esino in esame, compresi i vari sottobacini precedentemente individuati, è stato costruito mediante il software HEC HMS (versione 4.8), sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers, in analogia a quanto sviluppato nello studio condotto dal Consorzio di Bonifica delle Marche (rif. "Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico – Indagine condotta sui bacini idrografici dei fiumi Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti e Tenna").

Ogni sottobacino è schematizzato attraverso l'opzione "sub basin creation tool" all'interno del quale sono inseriti i dati relativi a: estensione del bacino, metodo di trasformazione afflussi-deflussi, metodo per il calcolo della pioggia efficace. I nodi idrologici (ovvero le confluenze) sono schematizzati attraverso l'opzione "junction creation tool". I tratti fluviali, che uniscono i vari nodi idrologici, sono schematizzati attraverso l'opzione "reach creation tool", all'interno del quale deve essere definito il metodo di propagazione della piena (routing method).

Nella figura seguente, si riporta il modello idrologico così costruito.

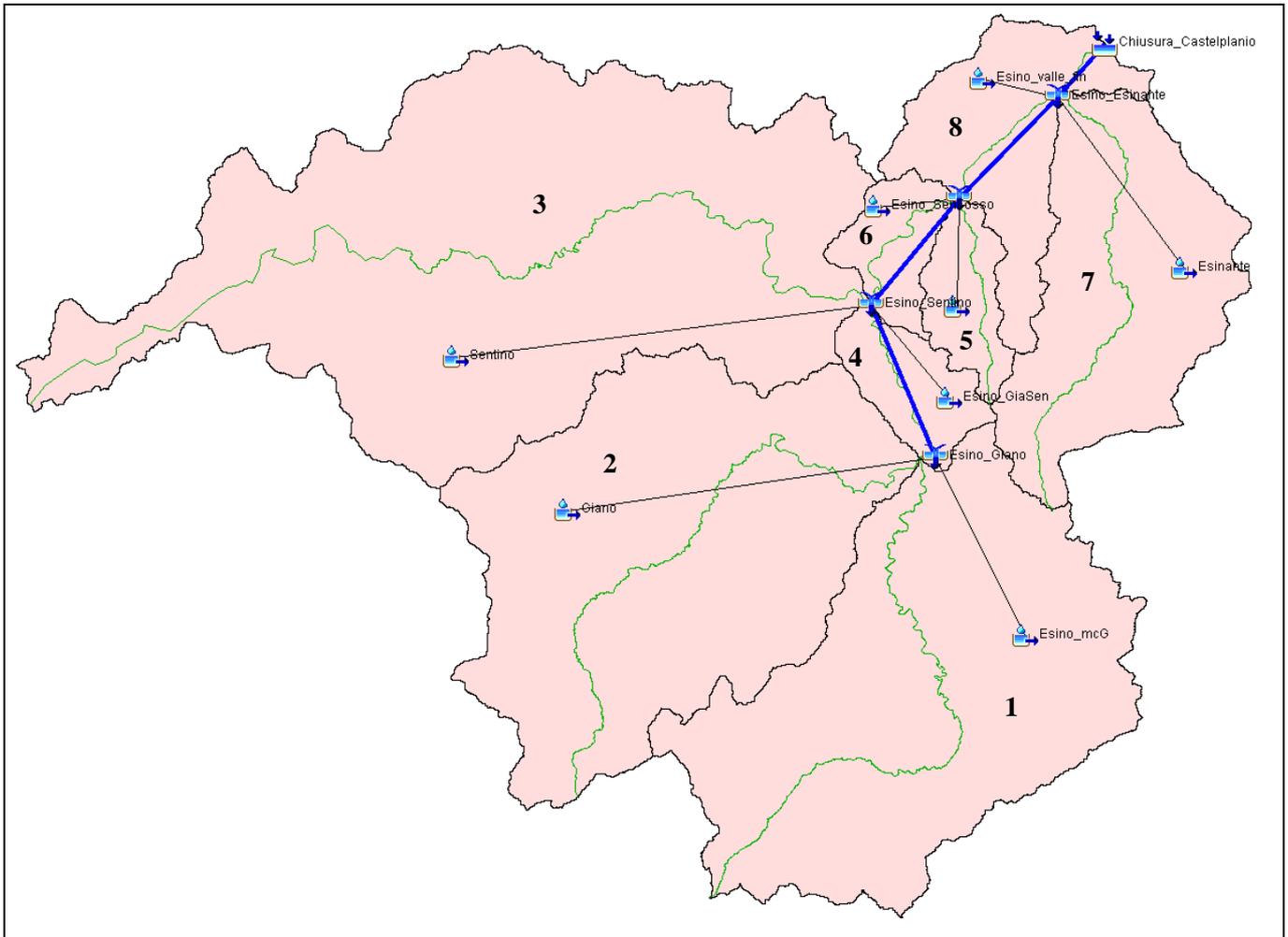


Fig. 13 – Costruzione del modello idrologico del sottobacino del Fiume Esino in esame in HEC HMS.

In generale, per il calcolo della pioggia netta o efficace ovvero del quantitativo di pioggia che partecipa effettivamente al deflusso, si è fatto riferimento al metodo del Soil Conservation Service che, utilizzando i valori del cosiddetto Curve Number (CN), permette di calcolare il volume di acque trattenuto nel terreno in funzione del tipo di copertura e uso del suolo e del tipo di suolo.

Il CN varia da 0 a 100; più alto è il valore, maggiore è il deflusso prodotto a parità di precipitazione. Il CN dipende da: classificazione della permeabilità del suolo secondo quattro gruppi idrologici del suolo (A, B, C, D); classificazione dell'uso del suolo e sistemazione della superficie (i.e. solchi dritti, solchi a reggipoggio, terrazzamenti,...); condizioni di drenaggio; condizioni iniziali di saturazione dei suoli (AMC).

Per la suddivisione in classi di suolo si è fatto riferimento alla “*Carta delle Province pedologiche*” della Regione Marche. Le differenti tipologie di suolo sono state inizialmente accorpate in 18 macrogruppi sulla base delle caratteristiche tessiturali, granulometriche e litologiche; ad ognuna di esse sono state poi assegnate, in percentuale, le quattro classi di permeabilità (A, B, C, D). Per la classificazione del territorio in base all’uso del suolo è stato invece utilizzato il Corine Land Cover 2018 al 4° livello (fonte: ISPRA). Il valore del CN così ottenuto corrisponde alla condizione II delle *Antecedent Moisture Conditions* (AMC), ovvero a quella che prevede terreni mediamente saturi.



Fig. 14 – Bacino del Fiume Esino: carta del Curve Number (AMC II).

Tale valore iniziale è stato modificato secondo la seguente relazione assimilandolo alla condizione III delle AMC:

$$CN(III) = \frac{CN(II)}{0.43 + 0.0057 \times CN(II)}$$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA          RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO          PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A

Per ogni sottobacino individuato del Fiume Esino è stato quindi valutato il valore medio del CN (II e III).

ID	Sottobacino	CN (II)	CN (III)
1	<i>F. Esino (a monte confluenza T. Giano)</i>	65	81
2	<i>T. Giano</i>	65	81
3	<i>T. Sentino</i>	45	66
4	<i>F. Esino (tra T. Giano e T. Sentino)</i>	65	81
5	<i>Fosso della Grotta</i>	54	73
6	<i>F. Esino (tra T. Sentino e F. Grotta)</i>	59	77
7	<i>T. Esinante</i>	62	79
8	<i>F. Esino (tratto finale)</i>	63	80

Tab. 7 – Valori del CN (II e III, AMC) per i sottobacini del Fiume Esino considerati.

La scelta del metodo di formazione della piena è ricaduta su quello dell'idrogramma unitario del Soil, Conservation Service che prevede il calcolo del cosiddetto *tempo di ritardo* (SCS Lag), stimato attraverso la formula di Mockus (SCS, 1972):

$$t_{lag} = 0.342 \cdot L^{0.8} s^{-0.5} \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}$$

in cui  $L$  è la lunghezza dell'asta principale (km);  $s$ , la pendenza media dell'asta principale (%); CN, il Curve Number;  $t_{lag}$ , il tempo di ritardo in ore.

Relativamente al metodo di propagazione della piena lungo i tronchi presenti nella schematizzazione di bacino, si è fatto riferimento al metodo del "tempo di ritardo" (*lag time*), stimato attraverso la relazione  $L/v$  con  $v$  = velocità media della corrente in alveo, assunta pari a 2 m/s.

Nelle tabelle seguenti, si riportano i valori del tempo di ritardo adottati per ognuno dei sottobacini in esame, nonché per ognuno dei tratti fluviali considerati.

ID	Sottobacino	SCS lag (ore)	SCS lag (minuti)
1	F. Esino (a monte confluenza T. Giano)	7.2	433
2	T. Giano	6.5	387
3	T. Sentino	23.7	72
4	F. Esino (tra T. Giano e T. Sentino)	1.2	72
5	Fosso della Grotta	1.8	105.6
6	F. Esino (tra T. Sentino e F. Grotta)	2.03	121.8
7	T. Esinante	4.2	250
8	F. Esino (tratto finale)	2.9	177

Tab. 8 – Valori del parametro SCS lag per i sottobacini del Fiume Esino considerati.

Tratto fluviale	Lunghezza (km)	Lag time (minuti)
Tra confluenza del T. Giano e del T. Sentino	7.2	60
Tra confluenza del T. Sentino e del F. della Grotta	7.0	58
Tra confluenza del F. della Grotta e del T. Esinante	5.5	46
Tra confluenza del T. Esinante e sezione finale	3.2	27

Tab. 9 – Modello idrologico del Fiume Esino: caratteristiche dei tratti fluviali.

Per la valutazione degli idrogrammi di piena di progetto ( $Tr = 50, 200, 500$  anni) si è scelto di adottare lo ietogramma di tipo Chicago (triangolare). Rispetto ad altri, questo rappresenta meglio alcune caratteristiche degli ietogrammi osservati, come la presenza del picco di intensità, le precipitazioni antecedenti e seguenti l'istante del picco e i volumi totali. Nello ietogramma Chicago, la massima altezza di precipitazione cumulata su qualsiasi durata  $t$  è sempre pari all'altezza di precipitazione dedotta dalla CPP per la medesima durata  $t$ .

#### 4.6.1. Calibrazione del modello

Implementato il modello idrologico nel software Hec HMS, si è proceduto alla sua calibrazione considerando un evento critico avvenuto in passato e ben documentato. A tale scopo è stato scelto come rappresentativo l'evento del 10-13 novembre 2013, che (come precedentemente descritto) ha interessato la quasi totalità del territorio regionale, con dissesti e fenomeni di esondazione. Per la

taratura del modello sono stati quindi utilizzati i valori di altezza di pioggia (ovvero gli ietogrammi) registrati durante l'evento (riportati nelle figure precedenti) presso le stazioni pluviometriche di riferimento, forniti dal Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche. Nello specifico, gli ietogrammi registrati presso i pluviometri considerati sono stati assegnati e distribuiti sui singoli sottobacini individuati mediante il metodo dei poligoni di Thiessen (o topoieti).

Nella tabella seguente, per ogni sottobacino considerato, si riportano le percentuali di superficie ricadente nei topoieti delle singole stazioni pluviometriche di riferimento.

Stazione\ID sottobacino	1	2	3	4	5	6	7	8
Arcevia	0	0	12%	0	0	7%	0	14%
Campodiegoli	0	36%	5%	0	0	0	0	0
Cantiano	0	0	1%	0	0	0	0	0
Cingoli	0	0	0	0	0	0	2%	0
Cupramontana	0	0	0	0	0	0	58%	40%
Esanatoglia	66%	5%	0	0	0	0	0	0
Fabriano	5%	52%	2%	0	0	0	0	0
Fonte Avellana	0	0	26%	0	0	0	0	0
Moie	0	0	0	0	0	0	1%	27%
Pioraco	3%	0	0	0	0	0	0	0
San Giovanni	19%	5%	3%	100%	100%	93%	39%	19%
Sassoferrato	0	2%	51%	0	0	0	0	0
Serralta	7%	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 10 – Percentuali di superficie dei singoli sottobacini del Fiume Esino considerati ricadente nei topoieti delle stazioni pluviometriche di riferimento.

La procedura di calibrazione è basata su valori di valori di portata o idrogrammi registrati in specifiche sezioni durante l'evento. In particolare, è noto il valore di portata del Fiume Esino a Camponoecchio (595 mc/s, fonte: "Rapporto di evento 10-13 novembre 2013, Centro Funzionale delle Protezione Civile delle Regione Marche"), subito dopo la confluenza del T. Sentino, e l'idrogramma di piena del Fiume Esino a Moie (fonte: Consorzio di Bonifica delle Marche "Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico – Indagine condotta sui bacini idrografici dei fiumi Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti e Tenna"), quindi in uscita dal modello idrologico. La taratura ha riguardato principalmente i valori di velocità media da assumere lungo i vari tratti fluviali considerati (valore finale = 2 m/s, come precedentemente introdotto) nonché le percentuali di superficie impermeabile (i.e. "impevious") da

considerare nei vari sottobacini (valori fino al 50%, soprattutto per i sottobacini montani, ovvero quelli relativi al Torrente Giano e al Fiume Esino prima della confluenza del T. Giano stesso).



Fig. 15 – Fiume Esino: ubicazione idrometro di Camponoecchio.

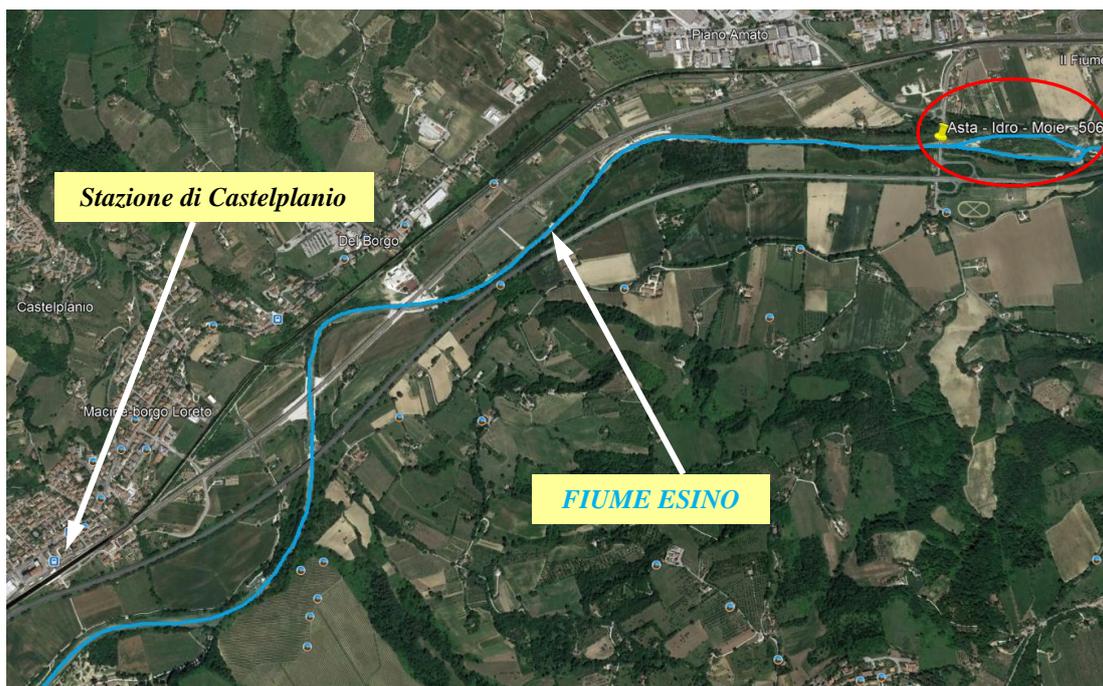


Fig. 16 – Fiume Esino: ubicazione idrometro di Moie.

Di seguito, i risultati del processo di calibrazione in termini di idrogrammi di piena (associati all'evento del 2013) nelle due sezioni sopra considerate, a Camponoecchio (nel nodo idrologico alla confluenza del T. Sentino) e a Moie (in uscita dal modello idrologico).

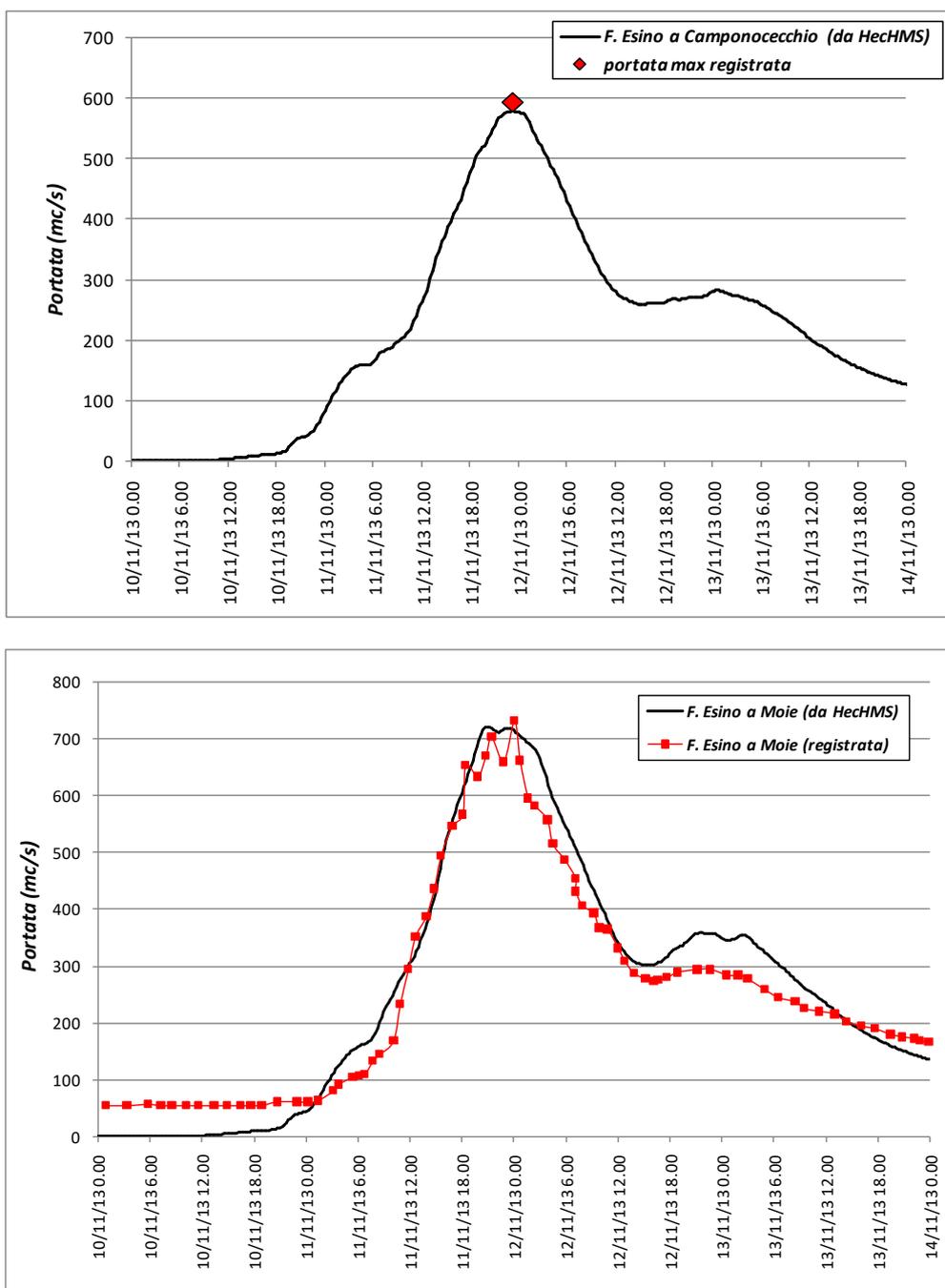


Fig. 17 – Modello idrologico del F. Esino, calibrazione (evento 2013): idrogrammi di piena a Camponoecchio e a Moie.

Si osserva una buona corrispondenza tra registrazioni e output del modello idrologico, con riferimento all'evento scelto (10-13.11.2013) e alle sezioni considerate.

Come controprova, il modello idrologico così calibrato è stato utilizzato per simulare un altro evento. A tal scopo, è stato considerato l'evento del 6-8 marzo 2017, sopra descritto. Sono stati quindi applicati gli ietogrammi registrati durante tale evento (riportati nelle figure precedenti) presso le stazioni pluviometriche di riferimento, forniti dal Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile della Regione Marche, secondo la distribuzione sui singoli sottobacini individuati ottenuta mediante il metodo dei poligoni di Thiessen o topoieti (Tab. 10).

Di seguito, si riportano i risultati della simulazione dell'evento del 2017 in termini di idrogramma di piena a Camponocchie (unico registrato e disponibile).

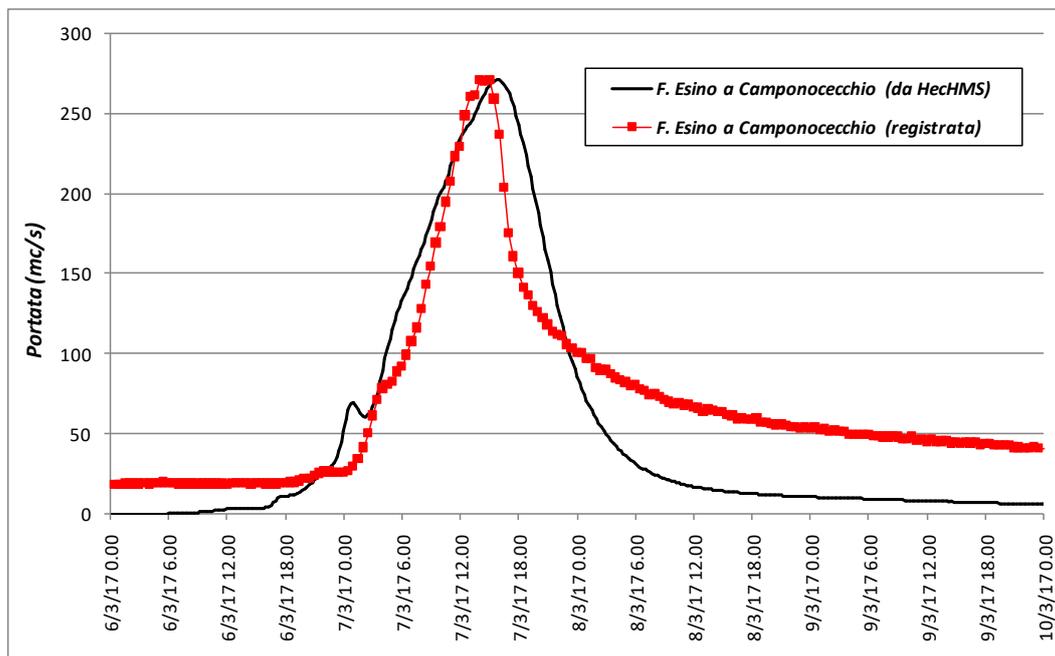


Fig. 18 – Simulazione dell'evento del 2017: idrogrammi di piena registrato e da modello HechMS.

Anche in questo caso, il modello idrologico (HechMS) costruito e calibrato (sull'evento del 2013) restituisce risultati, in termini di idrogrammi di piena, che riproducono abbastanza bene i dati registrati.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA          RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO          PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IROF	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A

#### 4.6.2. Determinazione degli idrogrammi di piena di progetto

Calibrato il modello idrologico, si è proceduto alla determinazione degli idrogrammi di piena di progetto, per i tempi di ritorno di riferimento ( $Tr = 50, 200, 500$  anni).

Dapprima, sono stati applicati gli ietogrammi di tipo Chicago (triangolare) costruiti assumendo una durata (critica) di pioggia pari a 12 ore (in analogia allo studio condotto dal Consorzio di Bonifica delle Marche: “Studio per la mitigazione del rischio idrogeologico – Indagine condotta sui bacini idrografici dei fiumi Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti e Tenna”) e adottando le curve di possibilità pluviometrica con  $Tr = 200$  anni derivanti dall’elaborazione statistica (Gumbel, Tab. 6) delle registrazioni presso le stazioni di misura considerate (distribuiti poi sui singoli sottobacini individuati mediante il metodo dei poligoni di topoi, Tab. 10) e dall’applicazione della procedura Va.P.I. – Regione Marche (stesso ietogramma applicato su tutti i sottobacini individuati, Tab. 4).

Di seguito, i risultati in termini di portate al colmo ( $Tr = 200$  anni) nei principali nodi idrologici e lungo i tratti fluviali di interesse ottenuti applicando i due set di curve di possibilità pluviometrica (CPP Gumbel vs Va.P.I.).

Bacino/tratto fluviale	Q200 (mc/s) Gumbel (12h)	Q200 (mc/s) Va.P.I. (12h)
Torrente Giano	405.3	459.6
F. Esino (a monte della confluenza del T. Giano)	336.6	421.1
F. Esino tra confluenze del T. Giano e del T. Sentino	738.8	876.9
F. Esino a Camponocchie	794.6	919.5
F. Esino tra confluenze del T. Sentino e del F. della Grotta	799.5	923.9
Bacino tra confluenze del F. della Grotta e del T. Esinante	127.3	139.3
Torrente Esinante	208.8	210.9
Sezione chiusura finale	931.6	1046.1

Tab. 11 – Fiume Esino: valori di portata al colmo per  $Tr = 200$  anni: CPP Gumbel vs Va.P.I..

Confrontando i valori riportati nella tabella precedente, si evince che ietogrammi derivanti dall’applicazione della metodologia Va.P.I. tendono a massimizzare le portate al colmo del Fiume Esino nel tratto fluviale oggetto di studio. Pertanto, si è deciso di applicare le CPP derivanti dalla metodologia Va.P.I. – Regione Marche nella determinazione degli idrogrammi di piena di progetto.

Definite le CPP di riferimento (i.e. Va.P.I. – Regione Marche), sono stati costruiti gli ietogrammi di tipo Chicago (triangolare) assumendo altri valori della durata di pioggia, nello specifico 6 e 24 ore, al fine di verificare se effettivamente la durata di 12 ore possa ritenersi “critica” per il sottobacino del Fiume Esino in esame. Applicando tali ietogrammi nel modello idrologico, si ottengono i seguenti risultati (in termini di portata al colmo con  $Tr = 200$  anni).

Bacino/tratto fluviale	Q200 (mc/s) Va.P.I. (12h)	Q200 (mc/s) Va.P.I. (6h)	Q200 (mc/s) Va.P.I. (24h)
<i>Torrente Giano</i>	459.6	413.5	413.8
<i>F. Esino (a monte della confluenza del T. Giano)</i>	421.1	369	391.9
<i>F. Esino tra confluenze del T. Giano e del T. Sentino</i>	876.9	778.6	803.9
<i>F. Esino a Camponocchie</i>	919.5	807.1	879.7
<i>F. Esino tra confluenze del T. Sentino e del F. della Grotta</i>	923.9	808.5	913.8
<i>Bacino tra confluenze del F. della Grotta e del T. Esinante</i>	139.3	139.8	113.1
<i>Torrente Esinante</i>	210.9	188.6	184.5
<i>Sezione chiusura finale</i>	1046.1	868.6	1027.8

Tab. 12 – Fiume Esino: valori di portata al colmo per  $Tr = 200$  anni, Va.P.I., per diversi valori della durata di pioggia critica.

Si osserva che la durata di pioggia pari a 12 ore tende a massimizzare i valori di portata al colmo nel tratto fluviale del Fiume Esino oggetto di studio. Pertanto, è confermata l’assunzione di durata di pioggia critica pari a 12 ore per il sottobacino in esame.

A questo punto, si è proceduto alla determinazione delle portate al colmo e dei corrispondenti idrogrammi di piena del Fiume Esino anche per i tempi di ritorno di 50 e 500 anni.

Di seguito si riportano i valori di portata al colmo e gli idrogrammi di piena finali, di progetto, assunti nelle successive modellazioni idrauliche (rif. IR0F00R09RIID0002001A), relativi ai sottobacini individuati e ai nodi idrologici in corrispondenza della confluenza del T. Sentino e del T. Esinante.

Con riferimento alle analisi idrologiche disponibili per l’area di intervento, i valori di portata al colmo ottenuti nel presente studio, per  $Tr = 50$  e  $200$  anni, sono conformi, ovvero leggermente superiori, a quelli indicati in Tab. 2 e Tab. 3, ad ulteriore conferma della adeguata calibrazione del modello idrologico sviluppato.

ID	Sottobacino	Q50 (mc/s)	Q200 (mc/s)	Q500 (mc/s)
1	F. Esino (a monte confluenza T. Giano)	332.4	421.1	480.6
2	T. Giano	362.7	459.6	524.5
3	T. Sentino	49.1	68.8	82.7
4	F. Esino (tra T. Giano e T. Sentino)	64.2	81.5	93.1
5	Fosso della Grotta	35.4	48.2	57.1
6	F. Esino (tra T. Sentino e F. Grotta)	36.3	49.0	57.7
7	T. Esinante	156.3	210.9	248.0
8	F. Esino (tratto finale)	103.8	139.3	163.3
-	Alla confluenza del T. Sentino	722.6	919.5	1052.0
-	Alla confluenza del T. Esinante	816.4	1046.1	1201.4

Tab. 13 – Fiume Esino: valori di portata al colmo di progetto per vari tempi di ritorno.

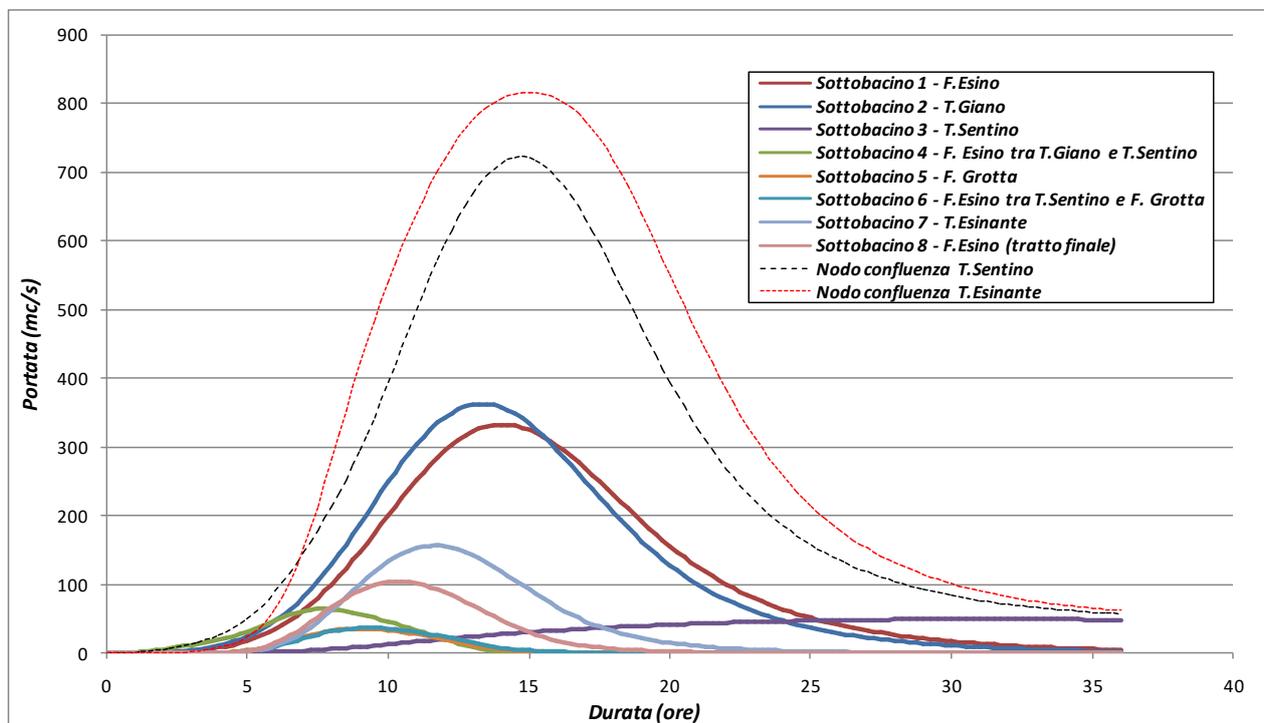


Fig. 19 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per  $Tr = 50$  anni.

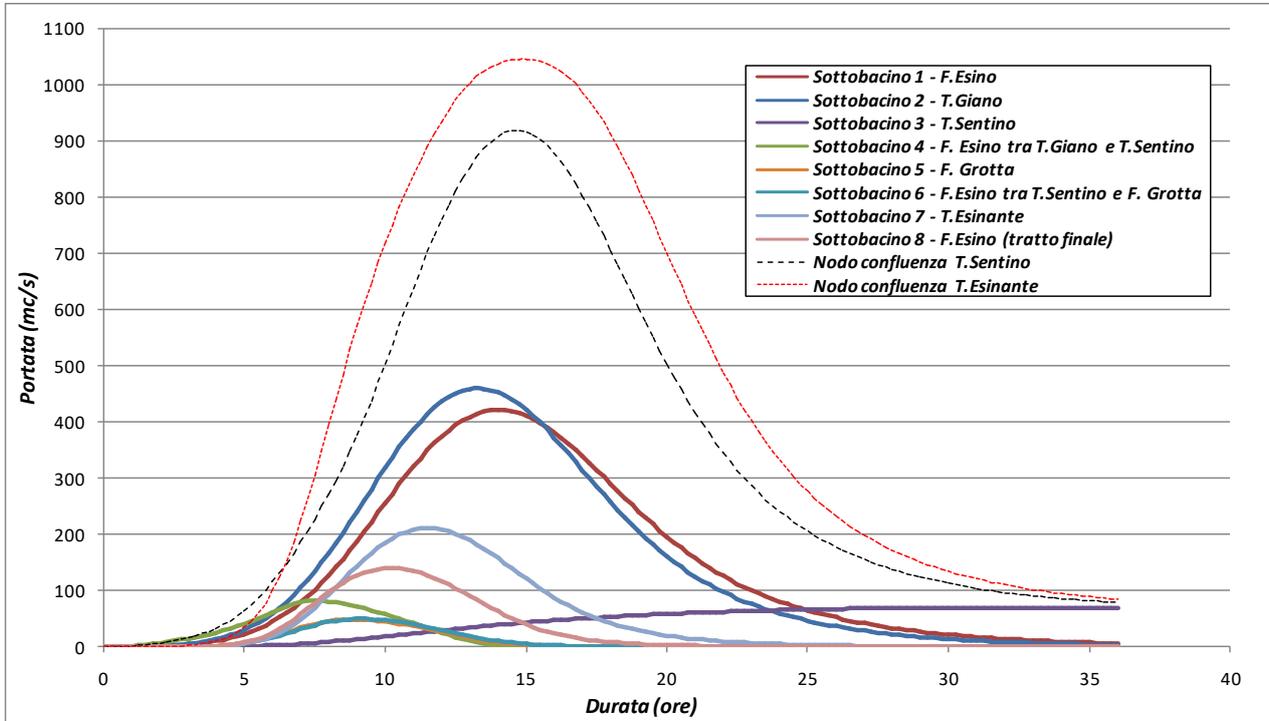


Fig. 20 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per  $Tr = 200$  anni.

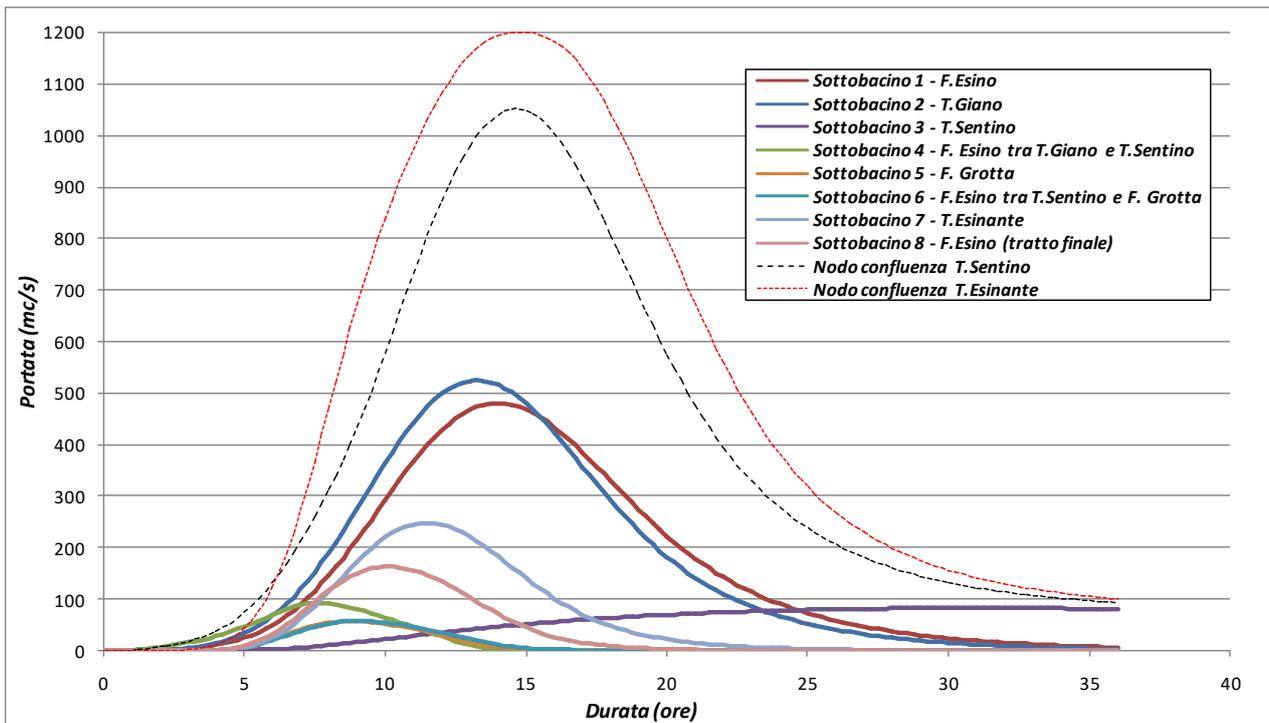


Fig. 21 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per  $Tr = 500$  anni.

## 5. FIUME ESINO: DEFINIZIONE DELLA PORTATA DI RIFERIMENTO PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE PROVVISORIALI IN ALVEO

Durante la costruzione delle opere di attraversamento fluviale (nel caso specifico dei nuovi viadotti previsti sul Fiume Esino), cioè prima che le stesse abbiano raggiunto il loro assetto definitivo, si pone il problema della definizione della portata di riferimento per il dimensionamento delle eventuali opere provvisorie del periodo transitorio.

A tal proposito, per la scelta della portata da utilizzare nella verifica della configurazione di cantiere, si è fatto riferimento alla curva di durata delle portate del Fiume Esino, relativa alla stazione idrometrica di Camponococchio, ubicata subito dopo la confluenza del T. Sentino, nel comune di Genga, reperita negli Annali Idrologici della Regione Marche degli ultimi venti anni di dati ed elaborazioni validate a disposizione (2005 – 2019).

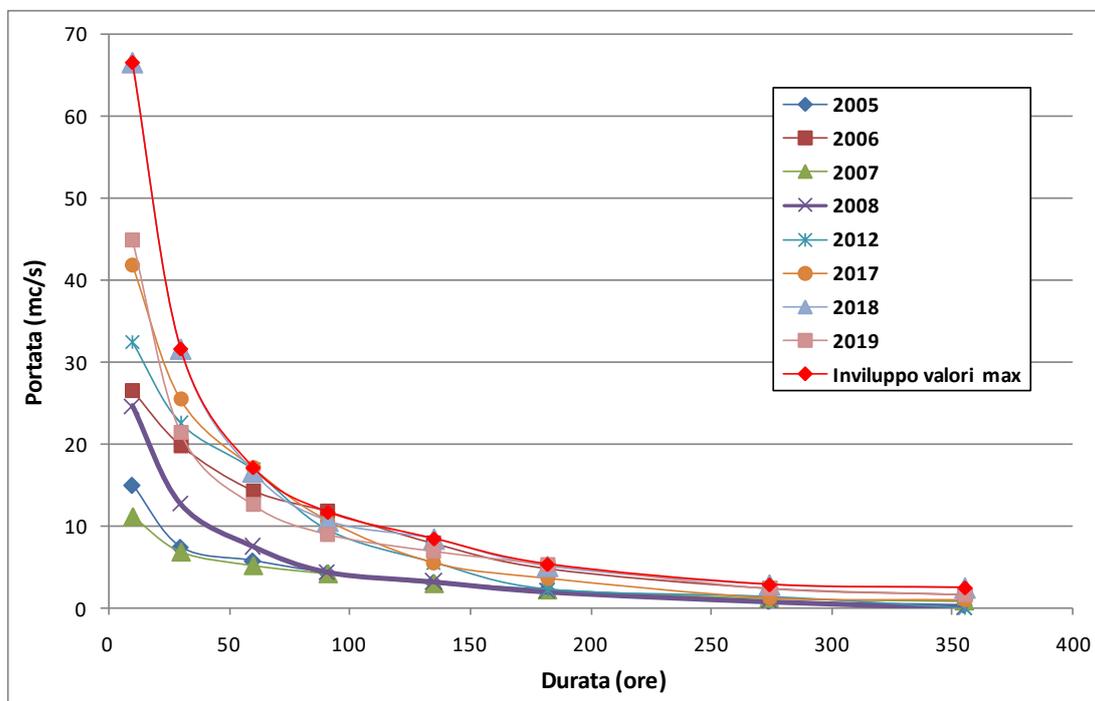


Fig. 22 – Fiume Esino a Camponococchio: curva di durata delle portate (fonte: Annali idrologici della Regione Marche).

Nello specifico, in relazione alle lavorazioni che verranno effettuate in alveo e alla loro durata, si è deciso di fare riferimento alla portata corrispondente a **10 giorni**, cioè si è ipotizzato che la portata del corso

d'acqua che transita in sicurezza nella configurazione di cantiere sia pari o inferiore a quella presente per 355 giorni all'anno nel tratto fluviale di interesse, ovvero si ammette una possibile interruzione dei lavori durante l'anno di almeno 10 giorni. Tale valore di portata si attesta a **66.5 m<sup>3</sup>/s** (dalla curva di durata, più gravosa, relativa all'anno 2018, nonché dalla curva di inviluppo dei valori massimi).

Relativamente alla stazione idrometrica di Moie (altra stazione di misura precedentemente considerata e di riferimento per il presente progetto), sono disponibili soltanto le curve di durata per gli anni 2005 e 2006, risultate comunque meno cautelative rispetto a quella adottata per la sezione di chiusura in corrispondenza di Camponocechio. Si è proceduto quindi alla costruzione della curva di durata delle portate del Fiume Esino a Moie sulla base della curva di inviluppo dei valori massimi determinata per Camponocechio, "trasferita" alla sezione di chiusura di Moie in dipendenza dell'estensione del bacino nelle due sezioni (615.6 km<sup>2</sup> a Camponocechio, 795.5 km<sup>2</sup> a Moie).

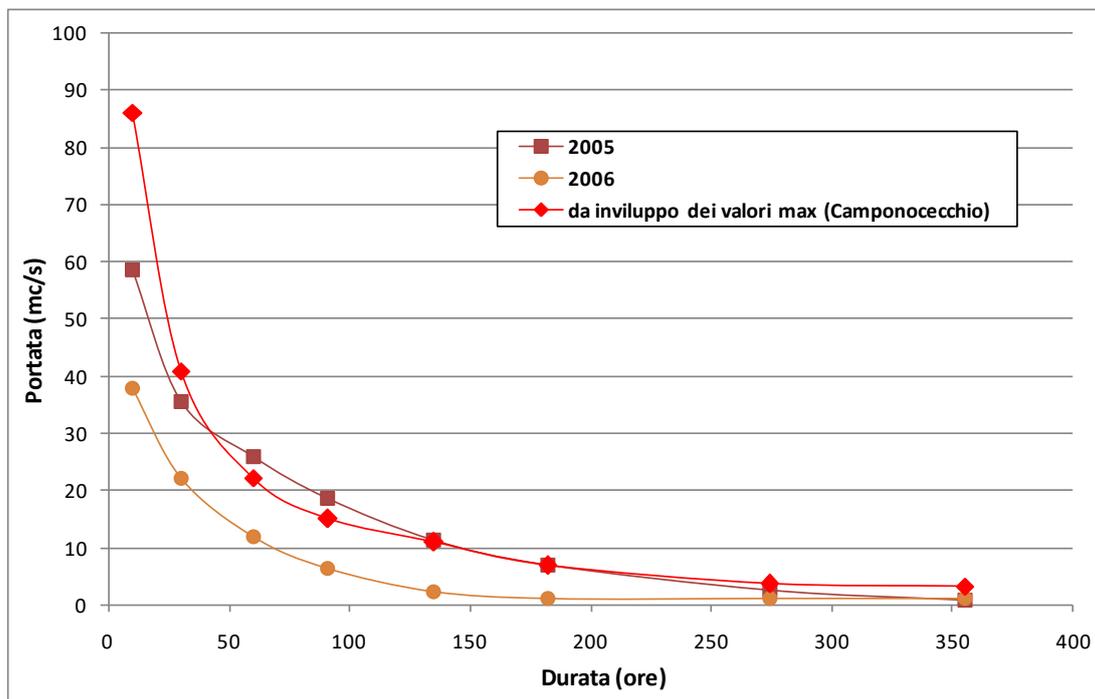


Fig. 23 – Fiume Esino a Moie: curva di durata delle portate (fonte: Annali idrologici della Regione Marche).

Il valore della portata a Moie corrispondente a **10 giorni** si attesterebbe dunque a **86.10 m<sup>3</sup>/s**.

Per maggiori dettagli circa la configurazione delle eventuali opere provvisorie ed il corrispondente dimensionamento, si rimanda alle relazioni idrauliche annesse.

	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO</b> <b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IR0F	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A

## 6. EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE PRECIPITAZIONI

La conoscenza delle variazioni climatiche sul territorio italiano, in corso e previste, è il presupposto fondamentale per la valutazione degli impatti e della strategia nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici (SNAC - MATTM, 2015). Mentre la conoscenza del clima presente e passato e delle variazioni in corso si fonda sulla osservazione delle variabili climatiche e sull'applicazione di metodi e modelli statistici di riconoscimento e stima delle tendenze in corso, la conoscenza del clima futuro si basa sulle proiezioni dei modelli climatici.

Secondo la definizione della *World Meteorological Organization* (WMO), le proiezioni climatiche forniscono la probabilità con cui determinate variazioni del clima possono verificarsi nei prossimi decenni, in relazione a diverse possibili evoluzioni dello sviluppo socio-economico globale.

Tali condizioni (scenari) comportano, in particolare, diversi andamenti delle emissioni di gas climalteranti in atmosfera. A tale proposito, l'*Intergovernmental Panel for Climate Change* (IPCC) ha recentemente ridefinito gli scenari futuri a scala globale (*Representative Concentration Pathways* – RCP), allo scopo di fornire informazioni sulla probabile evoluzione delle diverse componenti della forzante radiativa (emissioni di gas serra, inquinanti e uso del suolo), da utilizzare come input per i modelli climatici.

Gli scenari RCP sostituiscono i precedenti scenari pubblicati dall'IPCC nello *Special Report on Emission Scenarios* (SRES). I quattro nuovi RCP includono uno scenario di mitigazione, che stima un valore molto basso della forzante radiativa al 2100 (2.6 W/m<sup>2</sup> - RCP2.6), due scenari intermedi (4.5 W/m<sup>2</sup> - RCP4.5 e 6 W/m<sup>2</sup> - RCP6) e uno scenario caratterizzato da un'elevata emissione e da un elevato valore della forzante radiativa (8.5 W/m<sup>2</sup> - RCP8.5). Proprio l'IPCC ha introdotto una definizione più specifica del termine "proiezione climatica", riferendola alla stima delle variazioni del clima futuro che viene fornita dai modelli climatici. Questi ultimi possono essere classificati in due categorie, *globali* e *regionali*, che contraddistinguono la diversa scala spaziale delle simulazioni del clima futuro. I modelli regionali ("*Regional Climate Models*", RCM) rispondono alla necessità di fornire una migliore rappresentazione dei fenomeni a scala locale. Tali modelli, innestandosi su un modello globale da cui vengono acquisite le condizioni iniziali e al contorno, producono le proiezioni climatiche su una specifica area di interesse, ad una risoluzione più elevata (fino a una massima risoluzione orizzontale di 10-50 km). Recentemente l'ISPRA (rif. "*Il clima futuro in Italia: analisi delle proiezioni dei modelli regionali*", 2015) ha condotto l'analisi e il confronto tra le proiezioni climatiche in Italia più aggiornate prodotte da diversi modelli.

Dall'insieme degli output dei modelli climatici disponibili, sono state estratte e analizzate le proiezioni di precipitazione cumulata annuale fino al 2100 di quattro modelli, negli scenari di emissione RCP4.5 e RCP8.5. Nello specifico, sono stati selezionati i dati che ricoprono l'intero territorio nazionale e per tre orizzonti temporali, rappresentati da periodi di 30 anni (2021-2050, 2041-2060 e 2061-2090), sono stati calcolati sia i valori medi che gli indici rappresentativi degli estremi di precipitazione. Nelle figure seguenti, si riportano le mappe delle variazioni della precipitazione massima giornaliera (in 24 ore) previste da quattro modelli climatici (ALADIN, GUF, CMCC, LMD), nonché la variazione "media d'insieme" (ENSEMBLE MEAN), con riferimento ai tre orizzonti temporali considerati: 2021-2050; 2041-2070; 2061-2090, per i due scenari RCP4.5 e RCP8.5.

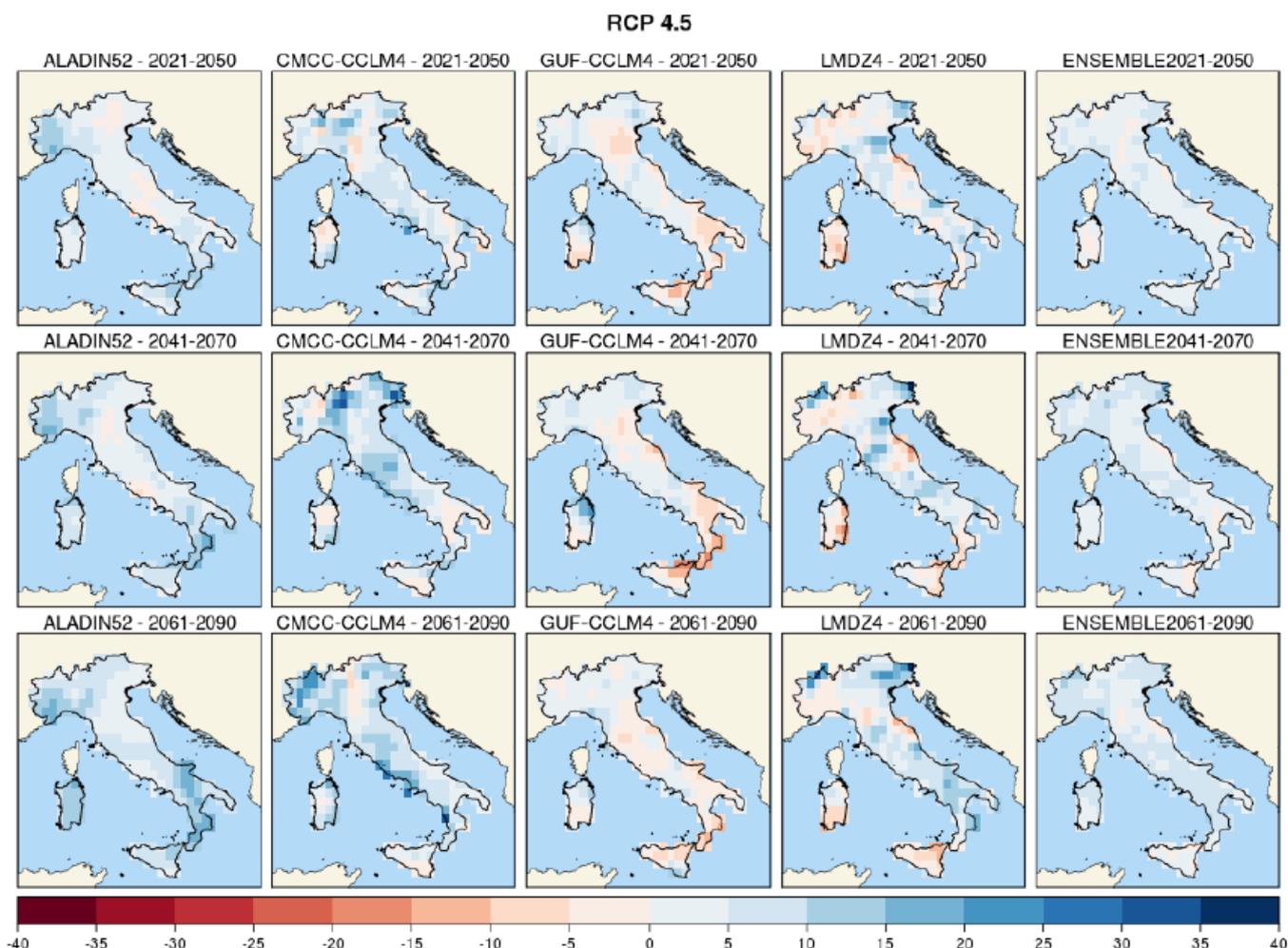


Fig. 24 – Precipitazione massima giornaliera (mm), scenario RCP4.5. Mappe delle variazioni previste dai modelli climatici per i tre orizzonti temporali 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga), 2061-2090 (terza riga).

In entrambi gli scenari, due modelli climatici indicano un aumento delle precipitazioni massime giornaliere su quasi tutto il territorio nazionale, di entità generalmente modesta (inferiore a 10 mm) e punte superiori a 20 mm in alcune zone.

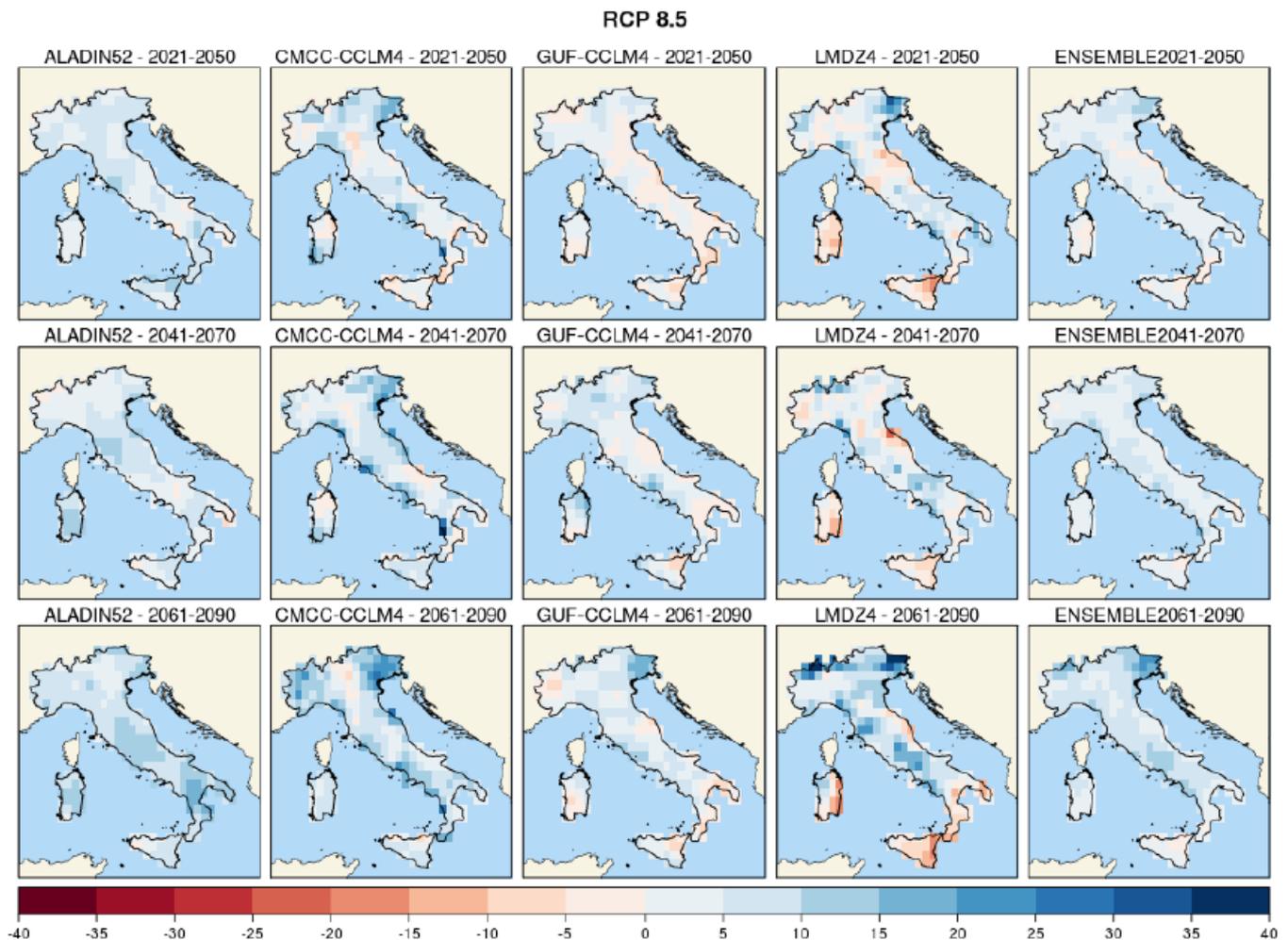


Fig. 25 – Precipitazione massima giornaliera (mm), scenario RCP8.5. Mappe delle variazioni previste dai modelli climatici per i tre orizzonti temporali 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga), 2061-2090 (terza riga).

Nella tabella seguente, si riportano i valori di variazione, “media di insieme” (ENSEMBLE MEAN) e prevista dai quattro modelli meteo climatici adottati/considerati, di precipitazione massima giornaliera (h24) (rispetto al valore medio nel periodo climatologico di riferimento 1971-2000), prevista nell’area di

intervento, per l'orizzonte temporale 2061-2090, con riferimento alla scenario "massimo" di emissione RCP8.5, dedotti dalle mappe sopra descritte.

Periodo	Variazione media (Emsemble mean) $h_{24}$ (RCP8.5)	Variazione da modello ALADIN52 $h_{24}$ (RCP8.5)	Variazione da modello CMCC-CCLM4 $h_{24}$ (RCP8.5)	Variazione da modello GUL-CCLM4 $h_{24}$ (RCP8.5)	Variazione da modello LMDZ4 $h_{24}$ (RCP8.5)
2061-2090	+0÷5 mm	+5÷10 mm	+15÷20 mm	-5÷0 mm	+0÷5 mm

Tab. 14 – Valori medio e previsti dai quattro modelli meteo climatici di variazione di precipitazione massima giornaliera nell'area di intervento (ISPRA, 2015).

Con riferimento alle analisi idrologiche sopra descritte, ed in particolare ai dati di pioggia registrati presso le stazioni di misura di riferimento, il valore medio di precipitazione massima giornaliera ( $h_{24}$ ), nel periodo climatologico di riferimento 1971-2000, ammonta a **64.90 mm**.

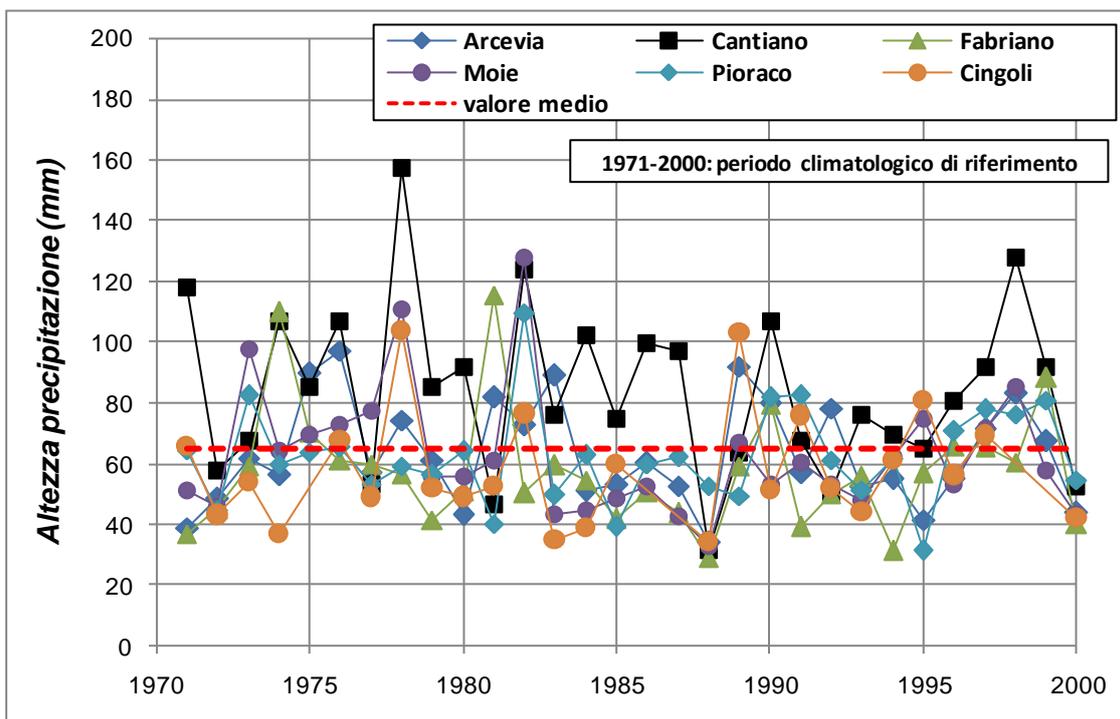


Fig. 26 – Stazioni pluviometriche di riferimento per il sottobacino del Fiume Esino in esame: serie storiche di dati di altezza di pioggia con durata pari a 24 ore (nel periodo climatologico 1971-2000).

Prendendo tale valore come riferimento, la variazione massima prevista, ossia +15-20 mm nel trentennio 2061-2090 secondo il modello meteo climatico più cautelativo (i.e. CMCC-CCLM4), corrisponderebbe ad un incremento della precipitazione massima giornaliera del 23-31%.

	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE IDROLOGICA</b>	COMMESSA IR0F	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0001 001	REV. A	FOGLIO 49 di 50

Analogamente, la variazione media prevista, ossia +0-5 mm nel trentennio 2061-2090 secondo la “media di insieme” (ENSEMBLE MEAN) dei risultati dei quattro modelli meteo-climatici adottati, corrisponderebbe ad un incremento della precipitazione massima giornaliera dell’ 8%.

Quest’ultimo valore di incremento previsto è sicuramente il più rappresentativo delle proiezioni climatiche disponibili previste anche dagli altri modelli meteo-climatici (e.g. il modello GUL-CCLM4 prevede addirittura una riduzione della precipitazione massima giornaliera).

Applicando (impropriamente) tali incrementi all’altezza di pioggia di progetto, riferita ad una specifica durata, ne deriva un contestuale aumento delle portate al colmo, della medesima entità.

Le considerazioni sopra esposte saranno prese come riferimento nelle analisi idrauliche a corredo del presente progetto per lo sviluppo di ulteriori verifiche di compatibilità sia delle opere di attraversamento (ponti/viadotti/tombini) sia dei sistemi di drenaggio della piattaforma stradale e ferroviaria (che saranno definiti con maggiore dettaglio nella successiva fase progettuale), nei confronti quindi anche di eventuali variazioni (nello specifico, incrementi) delle precipitazioni per effetto dei cambiamenti climatici.

In particolare, sulla base delle portate incrementate per effetto del cambiamento climatico, si è proceduto a verificare se le opere di attraversamento fluviale e di drenaggio previste in progetto consentano il transito delle portate di riferimento (a pelo libero, senza specifico franco minimo) nell’ipotesi di incremento delle precipitazioni, dedotto dalle proiezioni più cautelative (massimo scenario di emissione, massima variazione prevista, modello meteo-climatico più gravoso, massimo orizzonte temporale) ad oggi disponibili. In mancanza di una specifica normativa o linea guida di riferimento (a livello nazionale e/o locale) sul tema, si ritiene che tale criterio di verifica sia ragionevole e conforme alle indicazioni riportate nella Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (MATTM, 2015).

I risultati di tali verifiche saranno forniti nella successiva fase progettuale.

## 7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AA. VV. *Manuale di Ingegneria Civile e Ambientale*, Zanichelli ESAC, Bologna, 2003.

Da Deppo L., Datei C., *Fognature*, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 2005.

Ferro V., *La sistemazione dei bacini idrografici*, McGraw-Hill, Milano, 2006.

Maione U., *Appunti di idrologia 3. Le piene fluviali*, La Goliardica Pavese, 1977

Marani M., *Processi e modelli dell'Idrometeorologia*, Dispense, 2005.

Rossi F., Fiorentino M., Versace P., *Two component extreme value distribution for Flood Frequency Analysis*, Water Resources Research, Vol. 20, N.7, 1984.

Surendra, K. M., Vijay., P. S. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Springer, pp. 84-146, 2003.