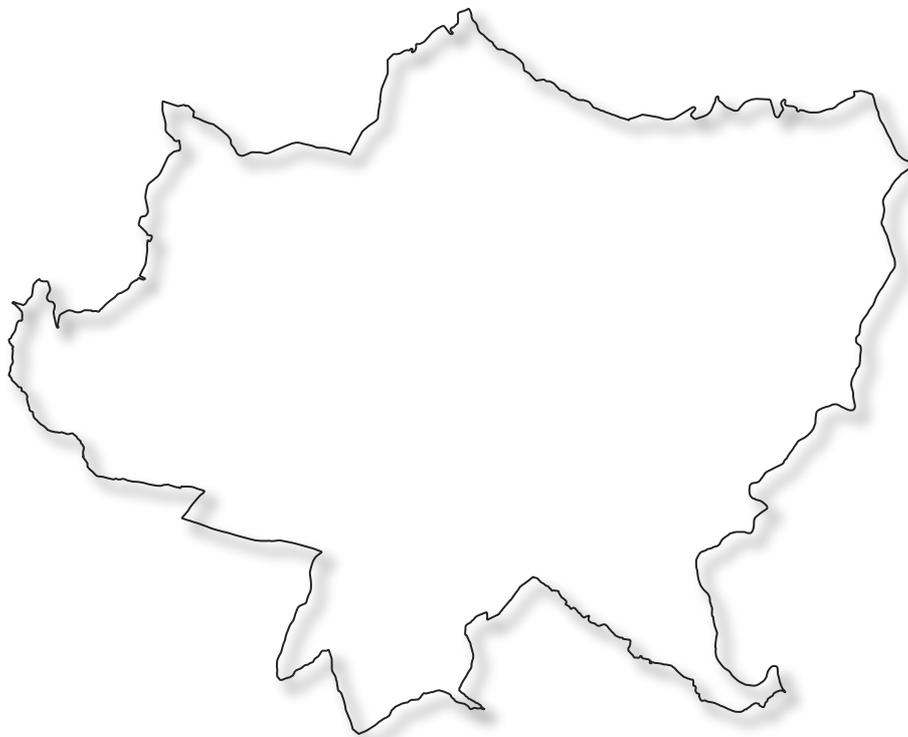


# R02

# Piano Strutturale



COMUNE  
DI SIENA



## Legge Regionale 41/2018

### Analisi della pericolosità d'alluvione del Torrente Arbia da valle della confluenza del Torrente Bornia a valle della confluenza col Torrente Tressa

progetto:

Roberto Vezzosi (capogruppo)

Febbraio 2020

Stefania Rizzotti, Idp studio

Luca Gentili e Idp progetti gis s.r.l., Sistema Informativo Territoriale

Monica Coletta (Studio tecnico Agostoli) e Bianca Borri, aspetti agronomici e paesaggistici

ATS s.r.l. (Cristina Felici), archeologia e beni culturali

#### Indagini geologiche, idrauliche e sismiche

ProGeo Engineering s.r.l.:

Massimiliano Rossi, Fabio Poggi, Laura Galmacci, Luca Berlingozzi,  
Davide Giovannuzzi, Gregorio Bartolucci, Mirko Frasconi

Sindaco: Luigi De Mossi

Andrea Debernardi ed Emanuele Gianmaria Ferrara, mobilità

Maria Rita Cecchini, edilizia sostenibile ed energia

Gaetano Viciconte, aspetti legali in materia edilizia e urbanistica

Fabrizio Cinquini (Terre.it) e Techland Engineering studio associato, VAS

Direzione Urbanistica:  
Responsabile Unico del Procedimento  
Paolo Giuliani

Ufficio Urbanistica:  
Lucia Buracchini, Marco Vannocci  
Rossana Papini



**INDICE**

|   |    |
|---|----|
| INDICE.....   | 1  |
| 1 PREMESSA E NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....  | 3  |
| 2 CARATTERISTICHE GEO-MORFOLOGICHE DELL'AREA DI STUDIO .....  | 5  |
| 2.1 Inquadramento Generale.....   | 5  |
| 2.2 Inquadramento geomorfologico.....   | 8  |
| 2.3 Inquadramento idrografico e definizione del reticolo di studio.....                                       | 9  |
| 2.4 Individuazione dei Bacini Idrografici.....  | 11 |
| 3 RILIEVO DELLE SEZIONI D'ALVEO E CARTOGRAFIA DI RIFERIMENTO .....  | 14 |
| 4 ANALISI IDROLOGICA .....  | 15 |
| 4.1 Linee Segnatrici di Possibilità Pluviometrica.....  | 15 |
| 4.1.1 Linee segnatrici di possibilità pluviometrica puntuali.....   | 15 |
| 4.1.2 Linee segnatrici di possibilità pluviometrica areali .....  | 19 |
| 4.1.3 Ietogramma di progetto .....  | 21 |
| 4.2 Pioggia effettiva.....  | 22 |
| 4.2.1 Modello di infiltrazione - Metodo SCS-CN .....  | 22 |
| 4.2.2 Determinazione del CN III.....  | 26 |
| 4.3 Portate di progetto. Trasformazione afflussi/deflussi .....   | 28 |
| 4.3.1 Modello SCS Idrogramma Unitario .....   | 29 |
| 4.3.2 Stima del <i>lag time</i> .....   | 30 |
| 4.3.3 Risultati della modellazione idrologica .....   | 30 |
| 4.3.4 Confronto del modello idrologico con un caso reale.....   | 47 |
| 4.3.5 Confronto idrologico con precedente studio sul T. Arbia .....   | 54 |
| 4.3.6 Idrogrammi di progetto su hec-Ras .....   | 57 |
| 5 ANALISI IDRAULICA.....  | 58 |
| 5.1 Descrizione della modellazione idraulica .....  | 58 |
| 5.2 Modellazioni idrauliche monodimensionali con Hec-Ras 5.0.7.....   | 58 |
| 5.3 Modellazioni idrauliche bidimensionali - HEC-RAS 5.0.7 .....  | 59 |
| 5.3.1 Modello geometrico DTM del terreno.....   | 61 |
| 5.3.2 Modifiche al modello geometrico DTM del Terreno: opere idrauliche a protezione di Taverne d'Arbia ..... | 63 |



|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.3.3 | Modifiche al modello geometrico DTM del Terreno: area a sud di Pianella, loc. Rondinella ..... | 66 |
| 6     | MAPPA DELLE AREE A PERICOLOSITA' D'ALLUVIONE .....   | 68 |
| 7     | MAPPA DEI BATTENTI, DELLE VELOCITÀ E DELLA MAGNITUDO IDRAULICA.....                            | 69 |
| 8     | CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....   | 71 |



## 1 PREMESSA E NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Con Decreto Dirigenziale del Responsabile del Settore Assetto del Territorio - Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile della Regione Toscana n. 16147 del 20-09-2019, il Comune di Siena è stato ammesso al finanziamento inerente al bando per la realizzazione di studi per l'implementazione delle mappe di pericolosità da alluvione e rischio di alluvioni, comprensive di carte dei battenti, velocità e magnitudo idraulica. Questa società è stata incaricata dall'Amministrazione comunale di Siena a predisporre l'implementazione delle suddette mappe di pericolosità da alluvione nell'ambito dell'aggiornamento del quadro conoscitivo di Piano Strutturale.

Il lavoro intende caratterizzare gli aspetti connessi alla probabilità di allagamento per fenomeni di esondazione del T. Arbia, a seguito di nota di assenso da parte dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, allegata alla richiesta di partecipazione al suddetto bando regionale.

La probabilità di allagamento analizzata è quella indotta dal superamento della capacità di deflusso dei corsi d'acqua oggetto di modellazione, causa dei fenomeni esondativi. Non sono inclusi gli aspetti di pericolosità prodotti da collassi strutturali (argini, ponti...).

Al fine di definire le perimetrazioni delle aree allagabili per eventi con  $Tr \leq 30$  anni ed eventi con  $30 < Tr \leq 200$  anni, sono state implementate le modellazioni idrologico-idrauliche monodimensionali e bidimensionali con il codice di calcolo HEC-RAS 5.0.7.

Con l'entrata in vigore della L.R. 41/2018, vale quanto segue:

Definizione e correlazione delle classi di pericolosità in funzione della frequenza degli eventi alluvionali (reg. attuazione 53/R, disciplina di PGRA e LR 41/2018):

| Reg. attuazione 53/R                              | PGRA  | LR41/2018  |
|---|---|--|
| aree a pericolosità idraulica molto elevata (I.4) | aree a pericolosità per alluvioni elevata (P <sub>3</sub> ) | aree a pericolosità per alluvioni frequenti      |
| aree a pericolosità idraulica elevata (I.3)       | aree a pericolosità per alluvioni media (P <sub>2</sub> )   | aree a pericolosità per alluvioni poco frequenti |

Il presente studio è stato quindi redatto in accordo con le linee guida dettate dalla Regione Toscana per la redazione degli studi idraulici di supporto agli Strumenti Urbanistici e si articola nelle seguenti fasi:



- **Quadro conoscitivo;**
- **Analisi idrologica** contenente la metodologia adottata per la stima delle portate di progetto per vari tempi di ritorno;
- **Analisi idraulica** contenente la descrizione delle modellazioni svolte (bidimensionale, moto vario...) ed i risultati conseguiti in termini di stima e localizzazione delle volumetrie di esondazione per i vari tempi di ritorno e la relativa perimetrazione delle aree allagate.

Il Torrente Arbia è considerato:

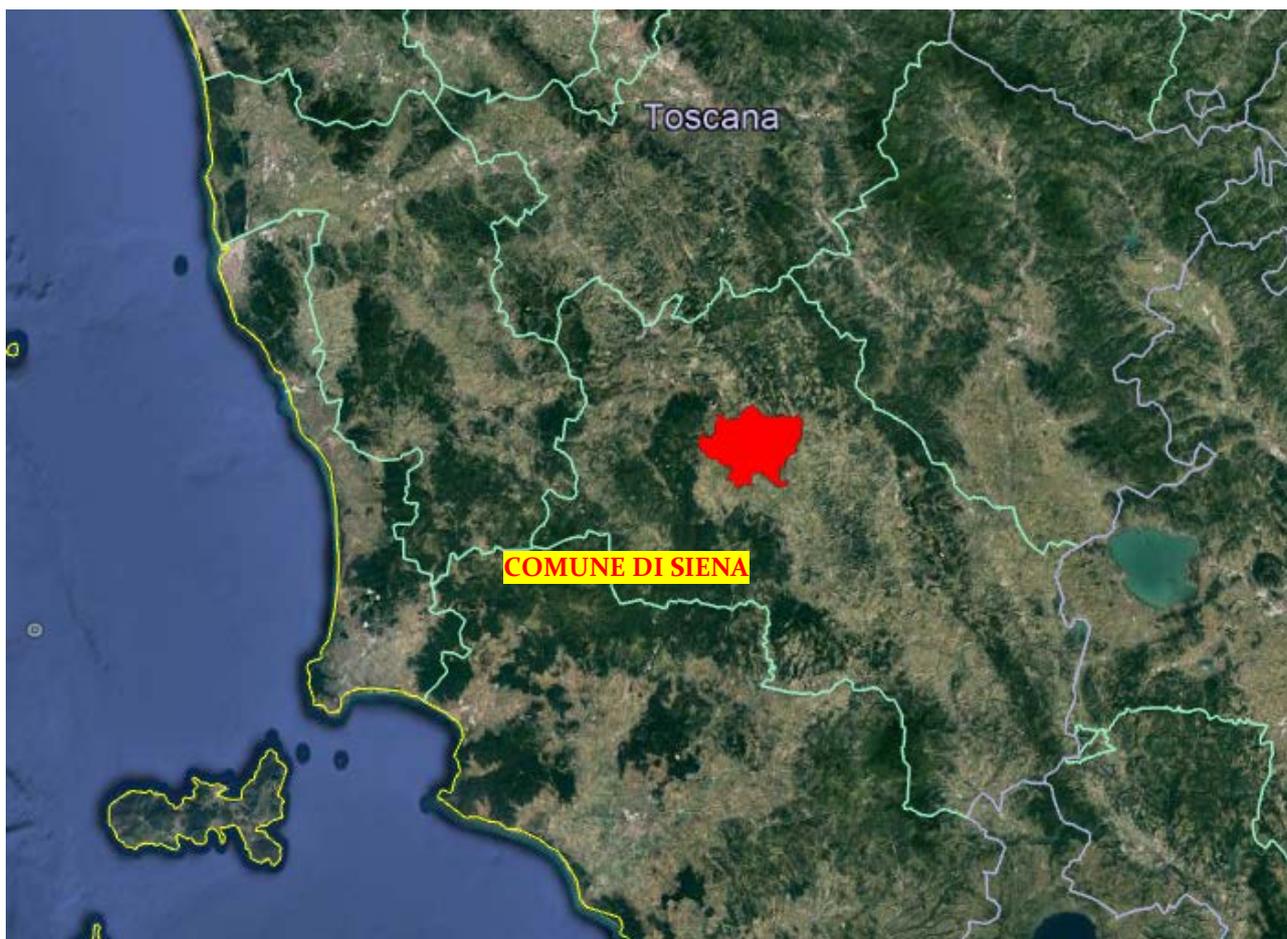
- Reticolo Principale ai sensi dell'art. 5 della Disciplina di Piano Gestione Rischio Alluvioni (PGRA), come riportato nell'Allegato 4, integrato tramite Delibera n. 11 del 19/12/2018 della Conferenza Istituzionale Permanente dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale;
- Reticolo idrografico Regionale di cui alla LR 79/2012 aggiornato con DCRT 20/2019.



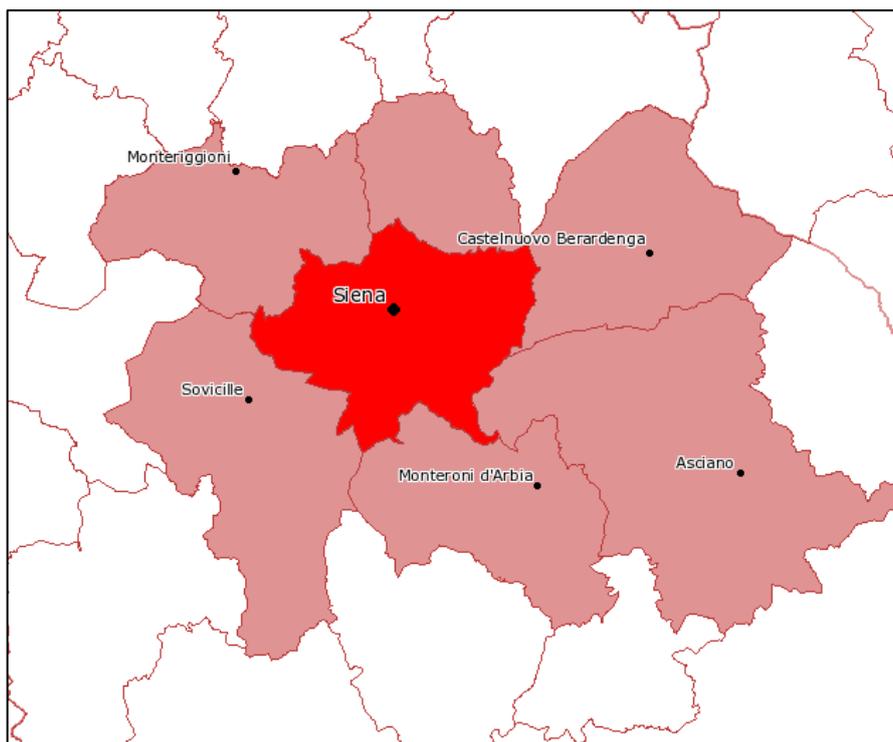
## 2 CARATTERISTICHE GEO-MORFOLOGICHE DELL'AREA DI STUDIO

### 2.1 Inquadramento Generale

Lo studio in oggetto riguarda il percorso del Torrente Arbia lungo il confine tra il Comune di Siena e i comuni di Asciano e Castelnuovo Berardenga (Figura 1.1 e Figura 1.2), a partire da Loc. Pianella a valle dell'immissione del T. Bornia, fino alla loc. Ponte a Tressa, a valle del T. Tressa.



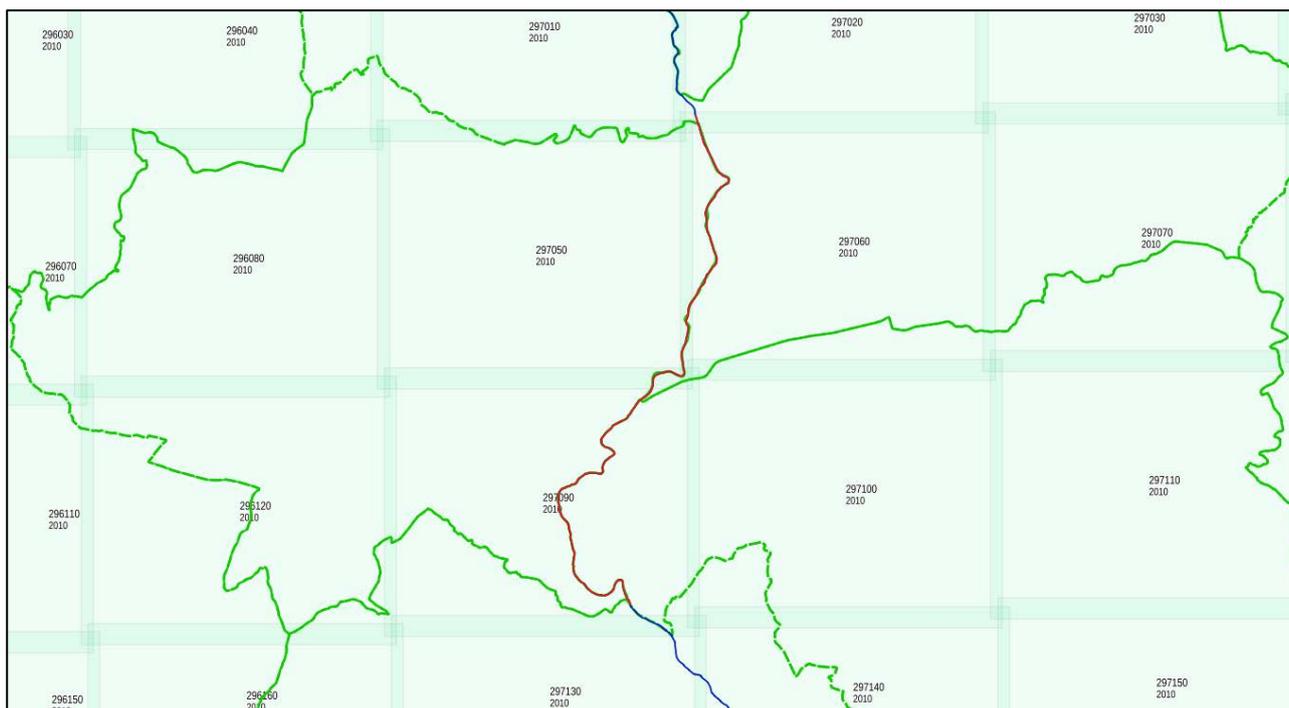
**Figura 2.1** - Individuazione del Comune di Siena (immagine da Google Earth).



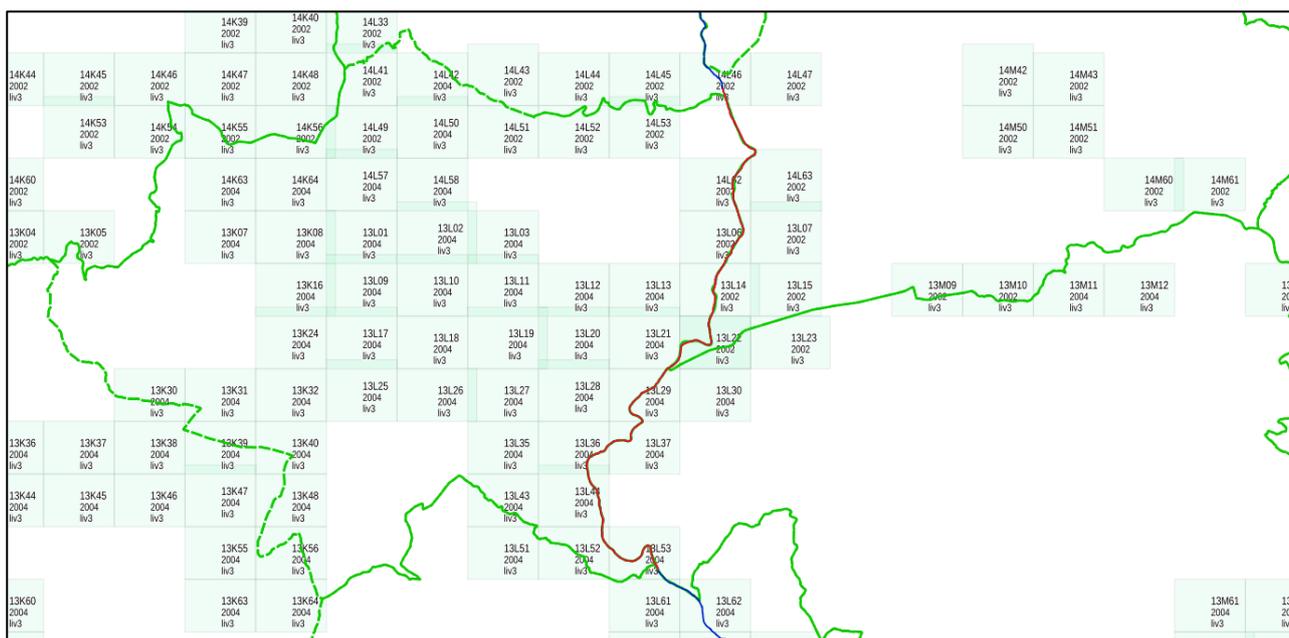
**Figura 2.2** - Inquadramento del Comune di Siena - limiti amministrativi.

Il percorso del Torrente Arbia oggetto di studio risulta inquadrato cartograficamente:

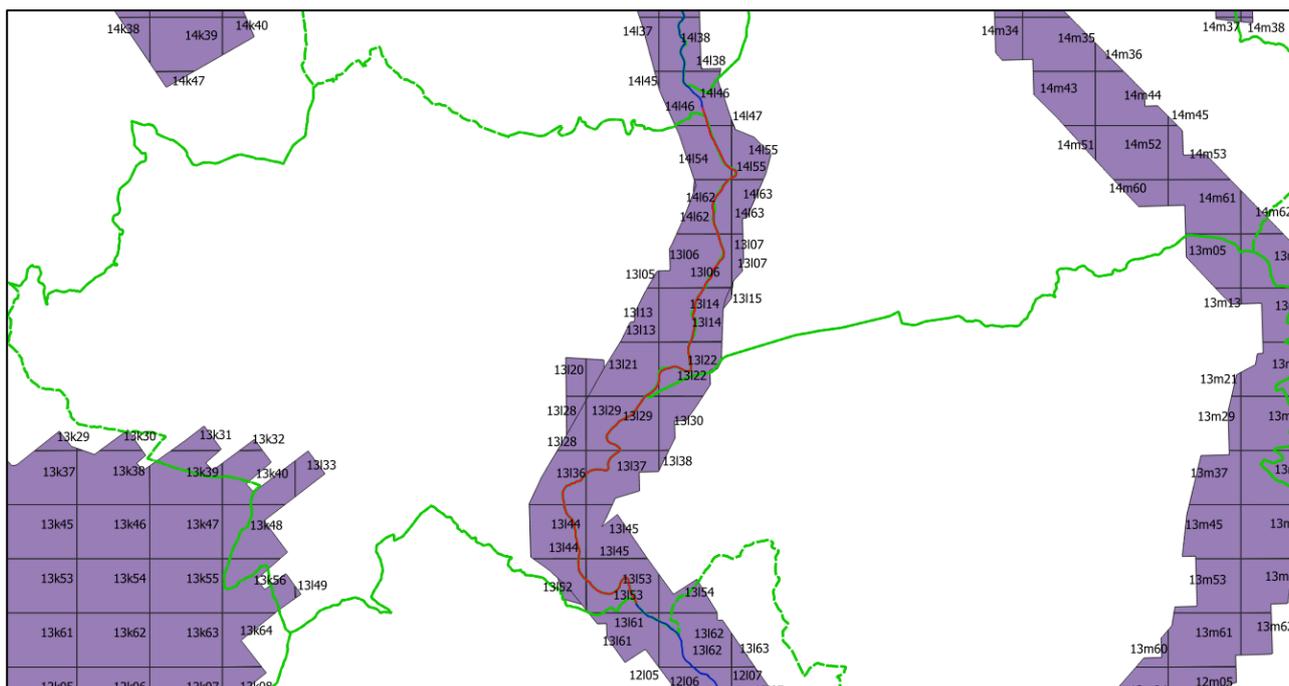
- Nei fogli della Cartografia Tecnica Regionale Toscana in scala 1:10.000 (Figura 2.3): 297060 2010, 297050 2010, 297090 2010.
- Nei fogli della Cartografia Tecnica Regionale Toscana in scala 1:2.000 (Figura 2.4): 14L46 2002, 13L21 2004, 13L29 2004, 13L36 2004, 13L37 2004, 13L44 2004, 13L52 2004, 13L53 2004.
- Nei fogli della Cartografia LIDAR della Regione Toscana (Figura 1.5): 14I46, 14I54, 14I55, 14I62, 14I63, 13I05, 13I06, 13I07, 13I13, 13I14, 13I20, 13I21, 13I22, 13I28, 13I29, 13I30, 13I36, 13I37, 13I38, 13I44, 13I45, 13I52, 13I53, 13I54, 13I61.



**Figura 2.3** – inquadramento CTR 1:10000 Regione Toscana, in verde i confini comunali, in blu il T. Arbia, in rosso il tratto del T. Arbia oggetto di studio



**Figura 2.4** – inquadramento CTR 1:2000 Regione Toscana, in verde i confini comunali, in blu il T. Arbia, in rosso il tratto del T. Arbia oggetto di studio



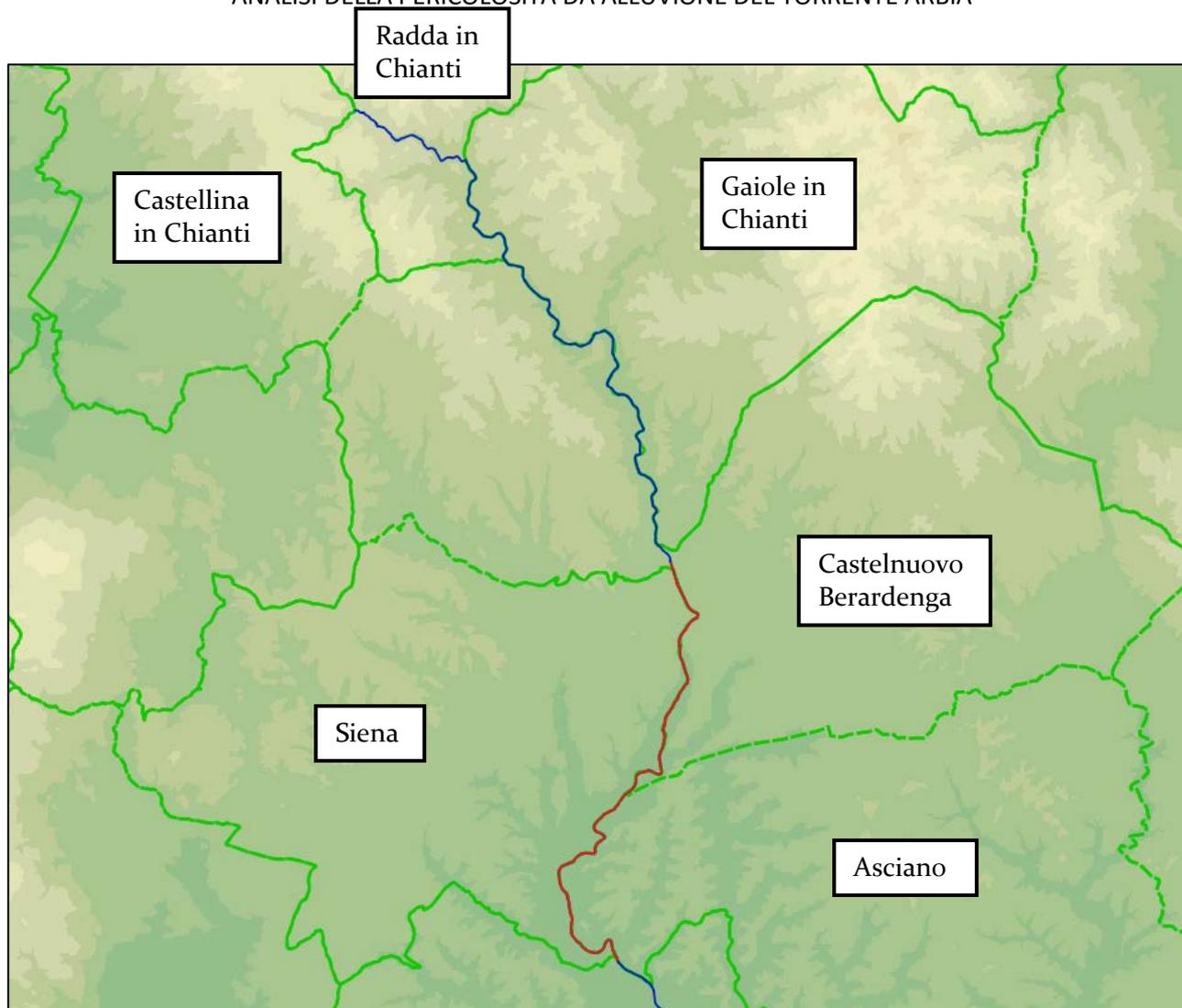
**Figura 2.5** – inquadramento LIDAR MATTM e Regione Toscana, in verde i confini comunali, in blu il T. Arbia, in rosso il tratto del T. Arbia oggetto di studio

## 2.2 Inquadramento geomorfologico

La valle del T. Arbia comprende i territori comunali di Siena ad ovest e Asciano ad Est, Castelnuovo Berardenga a Nord Est, Radda in Chianti, Gaiole in Chianti e Castellina in Chianti a Nord.

Il Torrente Arbia nasce dal Poggio della Macia Morta nel Comune di Castellina in Chianti, ed è collocato ad una quota compresa tra i 620 m s.l.m e i 160 m s.l.m in loc. Ponte a Tressa.

La morfologia del territorio (Figura 2.6) mostra generalmente il declivio del terreno in direzione sud-est, verso le valli del T. Arbia e del F. Merse.

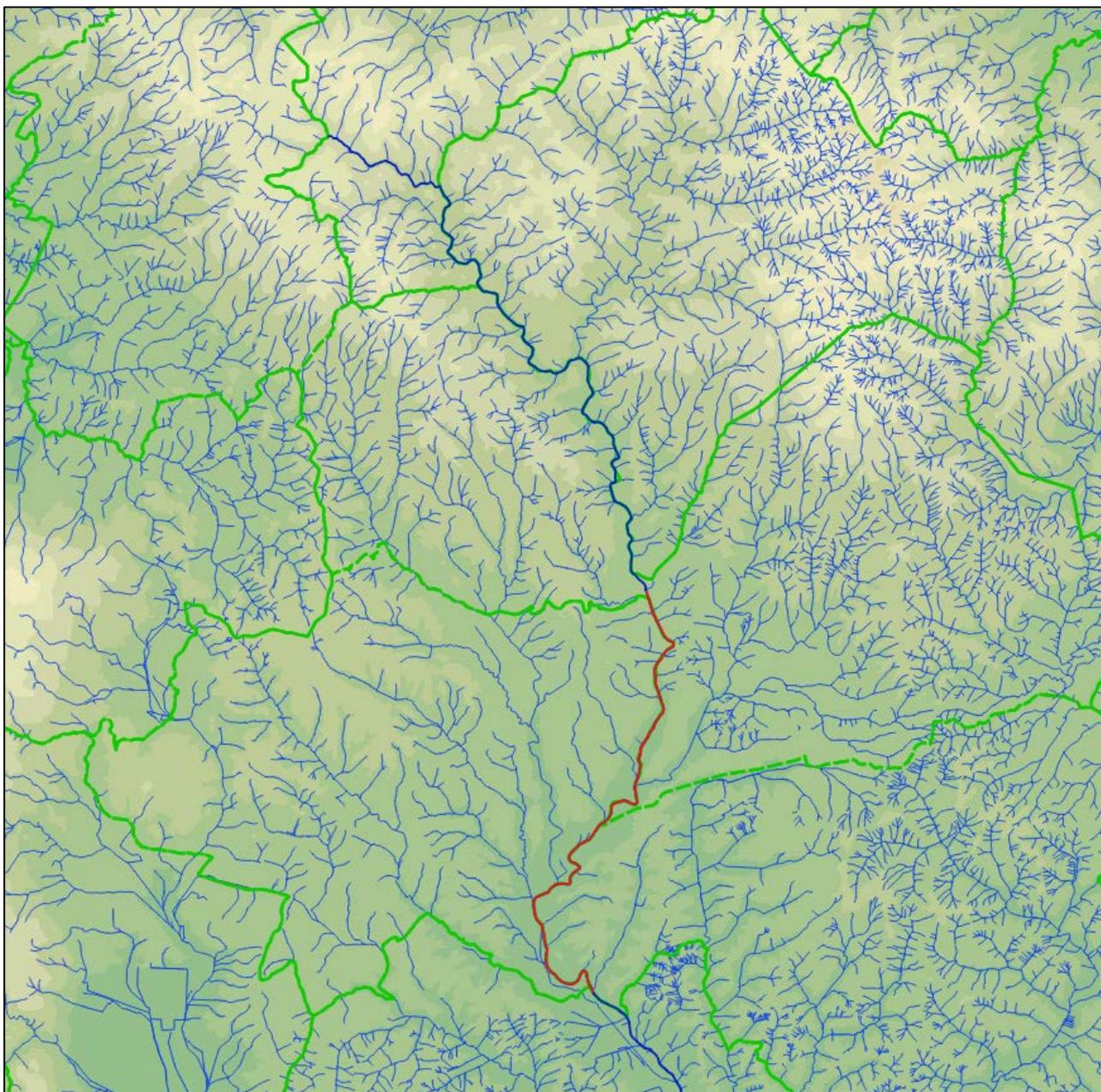


**Figura 2.6** – Vista morfologica dell'area del T. Arbia (Dati: DTM morfologico 10 m Regione Toscana), in verde i confini comunali, in blu il T. Arbia, in rosso il tratto del T. Arbia oggetto di studio

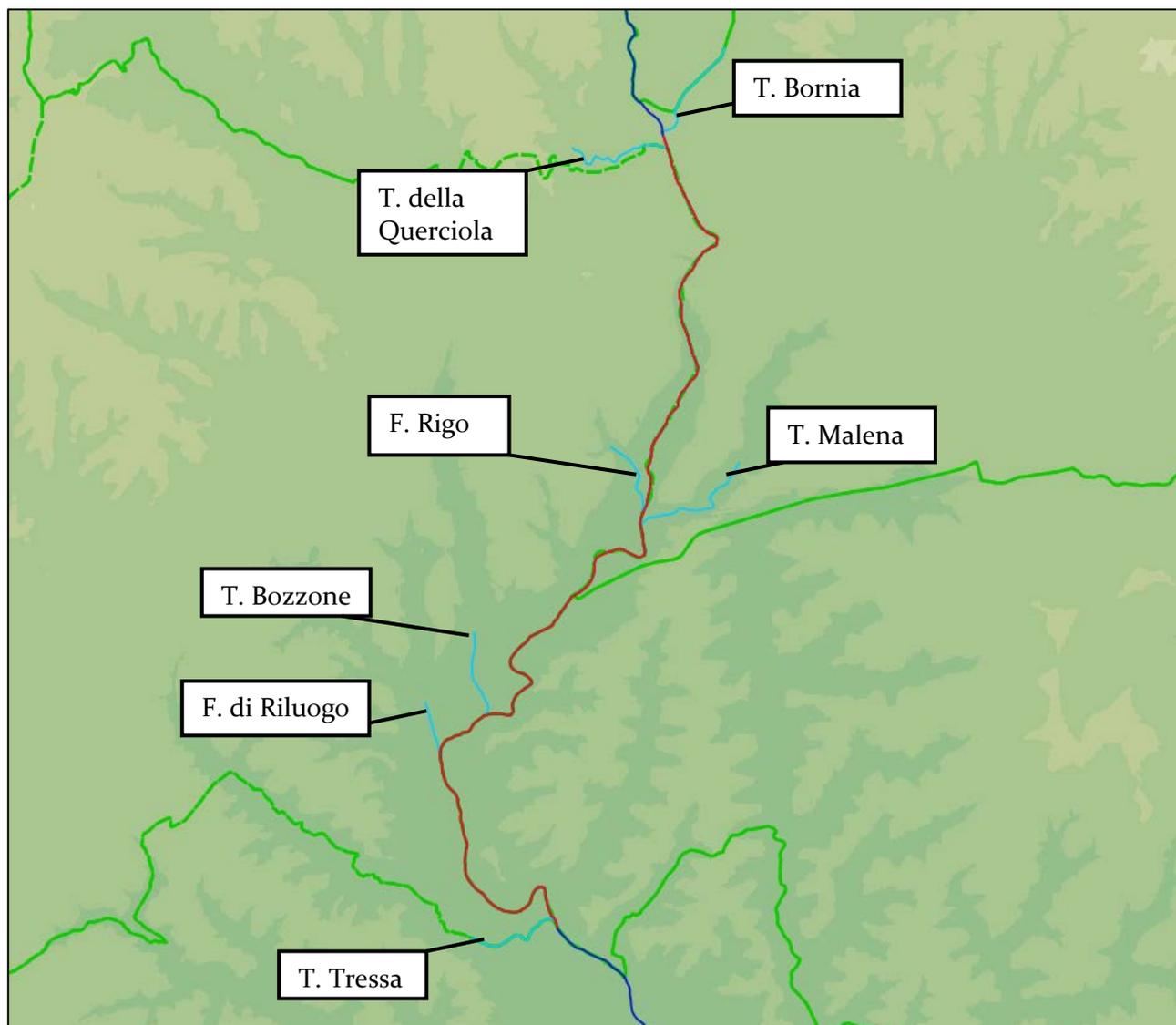
### 2.3 Inquadramento idrografico e definizione del reticolo di studio

Nella figura seguente è mostrato l'inquadramento del Reticolo Idrografico Regionale di cui alla L.R. 79/2012 aggiornato tramite DCRT n. 20/2019 (Figura 2.7).

Il T. Arbia oggetto di studio è individuato tramite i codici del Reticolo Idrografico Regionale: TS3469, TS3549, TS3608, TS3664, TS3693, TS3912, TS3963, TS4127, TS4130, TS4240, TS4269, TS4390, TS4605, TS4679, TS5203, TS5420, TS5499, TS5548, TS5560, TS5573, TS5608, TS5661, TS5707, TS5744, TS5749, TS5779, TS5811, TS6275, TS6420, TS6629, TS6888, TS7181, TS7208, TS7548, TS7788, TS8092, TS8239, TS8436, TS8454, TS8781, TS9124, TS9373, TS9503, TS9490, TS9578, TS9616.



**Figura 2.7** – inquadramento idrografico del T. Arbia di cui alla L.R. 79/2012 così come aggiornato con DCRT n. 20/2019, in blu le aste idriche, in verde i confini comunali, in blu il T. Arbia, in rosso il tratto del T. Arbia oggetto di studio



**Figura 2.8** – inquadramento idrografico del T. Arbia oggetto di studio, in celeste i principali affluenti, in verde i confini comunali, in blu il T. Arbia, in rosso il tratto del T. Arbia oggetto di studio

I principali affluenti del T. Arbia nel tratto oggetto di studio (individuati tramite il codice del Reticolo Idrografico Regionale riferito al tratto di immissione nel T. Arbia) sono: T. della Querciola (TS3538). F. Rigo (TS6276), T. Bozzone (TS7789), F. di Riluogo (TS8093) e T. Tressa (TS9634) in destra idraulica, T. Bornia (TS3382) e T. Malena (TS6083) in sinistra idraulica (Figura 2.8).

#### 2.4 Individuazione dei Bacini Idrografici.

Il Bacino idrografico del T. Arbia fa parte del territorio di riferimento dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale e del Genio Civile Toscana Sud.

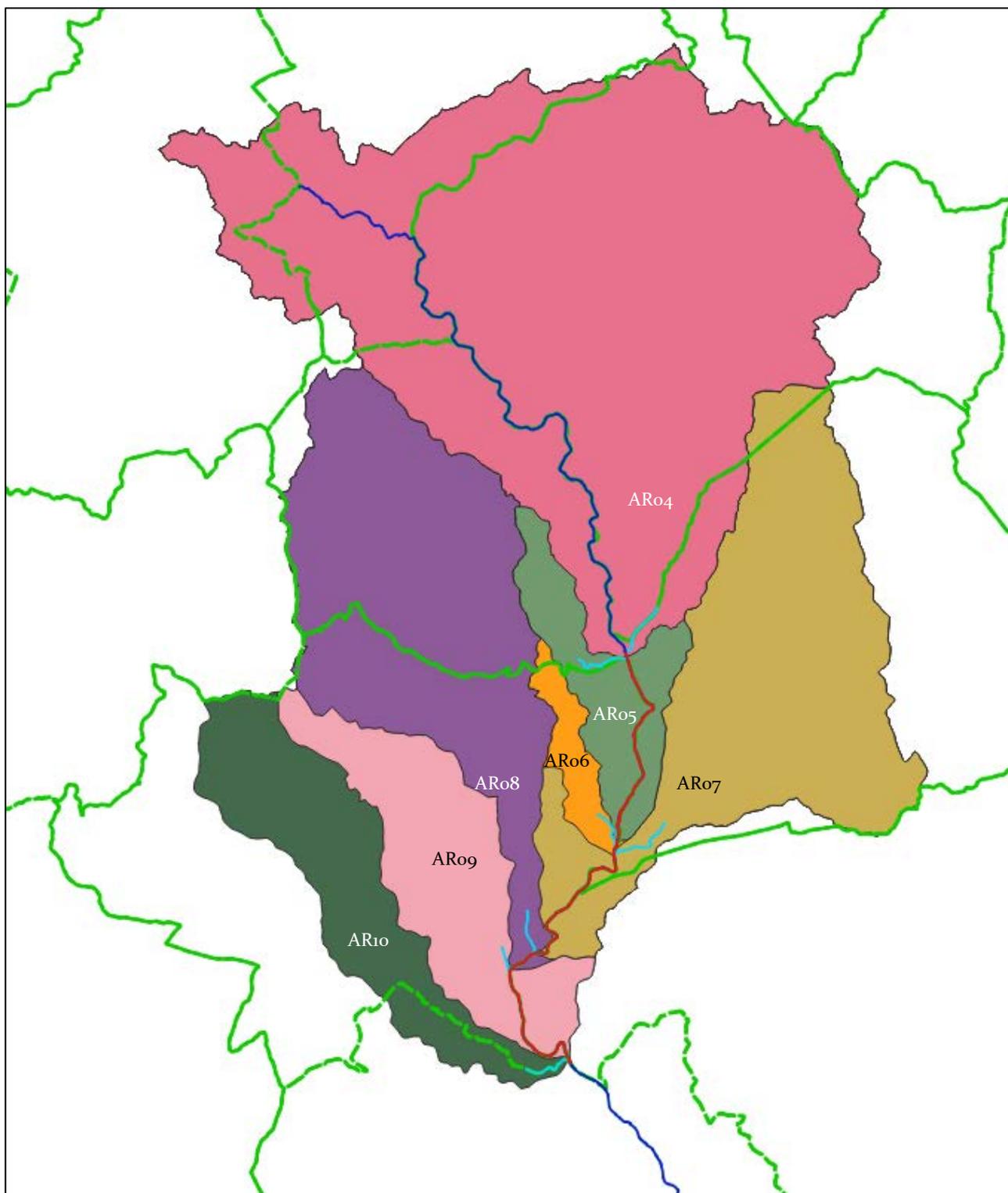


Per la definizione dei bacini oggetto di studio è stato fatto riferimento alla cartografia tecnica regionale e al modello digitale del terreno da Cartografia Lidar Regione Toscana.

L'impostazione di suddivisione in bacini deriva dalle sezioni di chiusura dopo le principali immissioni lungo il Fiume Arbia (ad esempio il bacino AR08 che fa riferimento alla sezione di chiusura a valle del T. Bozzone, comprende tutti i sottobacini da AR04 a AR07, come mostrati in Figura 2.9 ed è considerata sezione ultima quella a valle della confluenza con il T. Tressa, ovvero presso il limite comunale sud a Ponte a Tressa.

| Codice | Bacino idrografico       | Area sottobacino (km <sup>2</sup> ) | Area di tutto il bacino a monte della sezione di chiusura (km <sup>2</sup> ) |
|--------|--------------------------|-------------------------------------|--|
| AR04   | A valle del T. Bornia    | 156.1                               | 156.1  |
| AR05   | A valle del T. Querciola | 15.2                                | 171.3  |
| AR06   | A valle del F.so Rigo    | 4.9                                 | 176.2  |
| AR07   | A valle del T. Malena    | 61.5                                | 237.7  |
| AR08   | A valle del T. Bozzone   | 58.9                                | 293.6  |
| AR09   | A valle del T. Rilugog   | 27.9                                | 324.4  |
| AR10   | A valle del T. Tressa    | 27.2                                | 351.7  |

**Tabella 2.1** - Caratteristiche dei bacini di studio



**Figura 2.9** – Bacini idrografici del T. Arbia, in celeste i principali affluenti, in verde i confini comunali, in blu il T. Arbia, in rosso il tratto del T. Arbia oggetto di studio



### 3 RILIEVO DELLE SEZIONI D'ALVEO E CARTOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Il modello geometrico del terreno e dell'alveo del T. Arbia, utilizzato ai fini della modellazione idraulica, si basa sulla cartografia Lidar della Regione Toscana e MATTM (data volo: 2008).

L'adeguatezza della cartografia Lidar è stata verificata tramite un confronto con rilievi plano-altimetrici allo stato attuale.

Sono state rilevate 31 sezioni idrauliche lungo il corso del T. Arbia (eseguite dalla scrivente società) e confrontate con le relative tracce estratte dalla cartografia Lidar tramite strumentazione GIS. Le differenze principali sono:

- Quota del fondo alveo maggiore nelle sezioni Lidar (presenza di acqua durante il rilievo) mediamente di circa 40/50 cm rispetto alle sezioni rilevate allo stato attuale;
- Nei tratti rettilinei la posizione delle sponde destra e sinistra corrispondono nei due rilievi;
- Nei tratti in curva o nelle aree golenali sono riscontrate differenze di posizione della sponda esterna mediamente di circa 1/2 m.

La presenza di un fondo alveo a quota maggiore è comunque considerata cautelativa ai fini della realizzazione del modello idraulico di allagamento per eventi con Tr 30 e 200 anni.

La differenza di posizione delle sponde nelle aree curvilinee o golenali è dovuta alla naturale dinamica fluviale di erosione e sedimentazione che si realizza in un ambiente libero di impedimenti antropici e che è in continua evoluzione.

Complessivamente si denota una buona corrispondenza tra il rilievo dello stato attuale e il rilievo Lidar, per cui si ritiene di utilizzare quest'ultimo per realizzare un modello idraulico tramite software Hec-Ras che tenga conto di un modello monodimensionale relativo al solo alveo del T. Arbia e bidimensionale per la restante area conterminata potenzialmente allagabile. L'utilizzo della cartografia Lidar sia per il modello monodimensionale e bidimensionale permette un collegamento continuo ed una coincidenza completa nel passaggio tra i due modelli.

Il rilievo plano-altimetrico allo stato attuale ha riguardato anche le varie infrastrutture (ponti stradali, ferroviari) attraversanti il T. Arbia.





## 4 ANALISI IDROLOGICA

Lo scopo dell'analisi idrologica è la determinazione degli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno da impiegare come dati di ingresso per la successiva analisi idraulica dell'asta fluviale oggetto di studio.

In particolare, verranno valutate le condizioni di funzionamento idraulico per portate di progetto caratterizzate da tempi di ritorno pari a 30 e 200 anni (rispettivamente alluvioni frequenti e poco frequenti ai sensi della LR 41/2018) per verificare il grado di pericolosità idraulica a cui sono soggette le aree urbane limitrofe ai corsi d'acqua in seguito a fenomeni di tracimazione delle sommità spondali.

I passi, di seguito descritti, per determinare l'idrogramma di piena di progetto per ogni assegnato tempo di ritorno, sono:

- stima della relazione tra altezze e durata di pioggia di assegnato tempo di ritorno per i bacini idrografici in esame (linee segnalatrici di possibilità pluviometrica - LSPP) e operazioni di ragguglio all'area;
- determinazione dello ietogramma di progetto per ogni durata delle precipitazioni;
- stima delle perdite e della pioggia effettiva, che rappresenta il volume d'acqua che raggiunge per ruscellamento superficiale la rete di drenaggio fino alla sezione di chiusura, determinando l'evento di piena;
- schematizzazione della risposta del singolo bacino idrografico alle sollecitazioni meteoriche, in funzione delle proprie caratteristiche fisiografiche e combinazione di tale risposta con la pioggia netta per stimare le portate di progetto.

Per svolgere le analisi idrologiche su tutti i bacini oggetti dello studio, si è fatto uso del software HEC-HMS ver. 4.2.1 che, note le piogge, consente di procedere dalla definizione del modello di infiltrazione basato sul metodo SCS-CN (Soil Conservation Service, 1986) e del modello di formazione dell'onda di piena basato sull'idrogramma unitario istantaneo IUH-SCS, che è un idrogramma adimensionale definito dal SCS in base all'analisi di idrogrammi di piena in uscita dalla sezione di chiusura di numerosi bacini idrografici strumentati, di piccole e grandi dimensioni.

### 4.1 Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica

#### 4.1.1 Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica puntuali

Il primo elemento fondamentale nella creazione di un modello idrologico è costituito dalla stima degli afflussi meteorici: lo studio statistico delle piogge intense in un punto della superficie terrestre si sintetizza nella formulazione delle Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica (LSPP), ottenute





a partire dall'elaborazione delle serie storiche dei valori massimi annuali delle altezze di precipitazione di assegnata durata, fornite da registrazioni pluviometriche.

Le LSPP descrivono le proprietà statistiche degli eventi di pioggia intensa a scala puntuale ed esprimono un legame tra altezza di pioggia, durata e frequenza. In particolare, per un prefissato tempo di ritorno, la corrispondente LSPP fornisce la relazione tra la durata della pioggia e la relativa altezza di precipitazione.

Per la stima delle LSPP per l'area in esame è stato fatto riferimento ai risultati dello studio "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012", realizzato nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012, con l'obiettivo di aggiornare le analisi di frequenza delle precipitazioni estreme sul territorio toscano fino all'anno 2012 compreso.

I risultati di tale studio sono consultabili sul sito del Servizio Idrologico Regionale - Centro Funzionale Regionale di Monitoraggio Meteo - Idrologico alla pagina <http://www.sir.toscana.it/index.php?IDS=4&IDSS=19>.

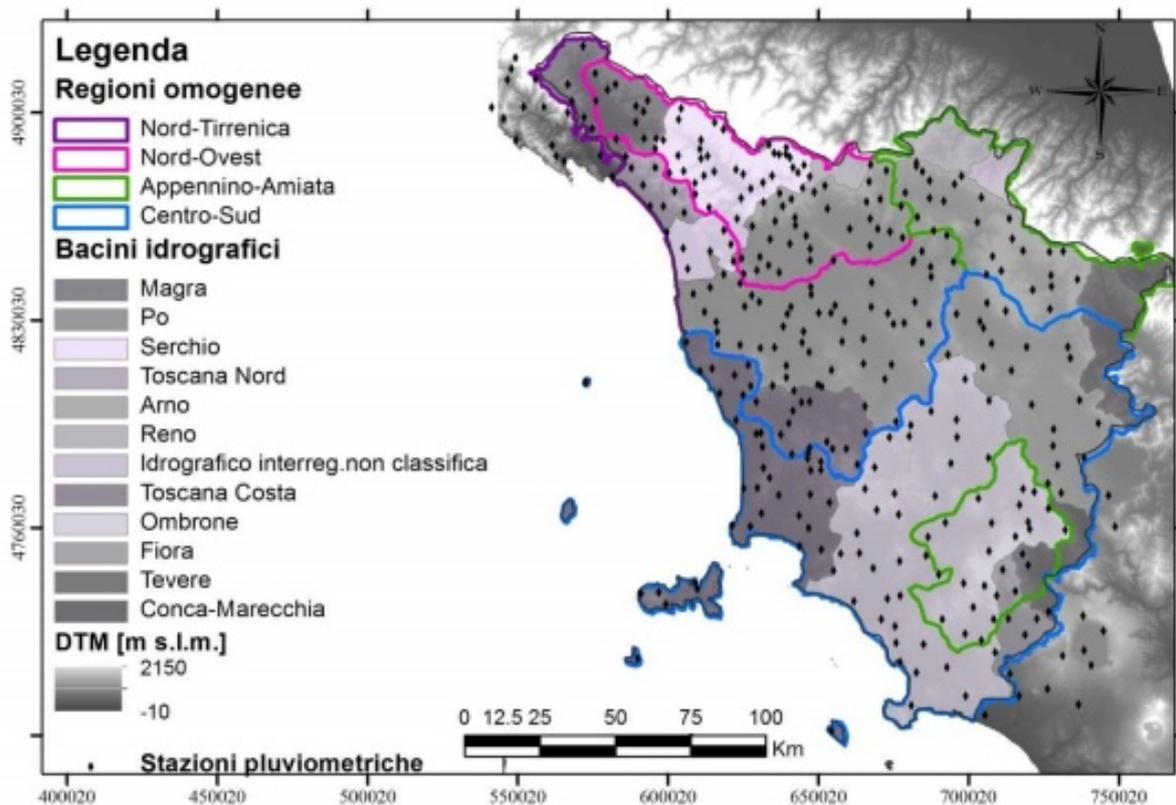
Il primo passo in una procedura di regionalizzazione è l'individuazione di regioni omogenee, all'interno delle quali le grandezze, o meglio le loro distribuzioni di frequenza, hanno alcune caratteristiche comuni.

Nello studio "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012" per la stima della variabile casuale  $h(t)$ , massimo annuale dell'altezza di pioggia di durata  $t$ , è stato utilizzato un metodo basato sulla legge di distribuzione probabilistica TCEV Two-Component Extreme Value secondo un approccio gerarchico a tre livelli.

Al primo livello di regionalizzazione sono state individuate una o più zone omogenee all'interno delle quali si può ammettere costante il coefficiente di asimmetria teorico. Al secondo livello di regionalizzazione sono state individuate delle sottozone omogenee nelle quali si può ritenere costante, oltre al coefficiente di asimmetria teorico, anche il coefficiente di variazione teorico e al terzo livello di regionalizzazione sono state infine individuate delle aree omogenee all'interno delle quali si ricercano delle relazioni tra la pioggia indice  $\mu$  e le caratteristiche geografiche del sito.

L'area di studio indagata comprende i bacini idrografici dei corsi d'acqua principali della Regione Toscana, come l'Arno, il Serchio e l'Ombrone Grossetano, bacini più piccoli di fiumi della costa tirrenica e i bacini attigui dei Fiumi Magra e Fiora. Una volta validato il set dei dati (aggiornati all'anno 2012) è stata ottenuta la consistenza definitiva delle serie temporali di valori annui di pioggia massima.

Tra le varie ipotesi di suddivisione in regioni omogenee del territorio di studio è stata scelta, dopo opportune verifiche, quella in 4 regioni: NORD-TIRRENICA, NORD-OVEST, APPENNINO-AMIATA, CENTRO-SUD coincidenti con le 4 sub-regioni (Figura 4.1).



**Figura 4.1** - Suddivisione dell'area di studio in regioni omogenee - "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012"

Con altezza di precipitazione in un punto, comunemente misurata in mm, si intende l'altezza d'acqua che si formerebbe al suolo su una superficie orizzontale e impermeabile, in un certo intervallo di tempo (durata della precipitazione) trascurando le perdite.

La stime delle altezze di pioggia per le diverse durate caratteristiche (1, 3, 6, 12 e 24 ore) e i diversi tempi di ritorno fissati (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni), sono state ottenute come prodotto dei valori della pioggia indice  $\mu$  per le diverse durate ed il fattore di crescita adimensionale  $KT$  per i diversi tempi di ritorno validi per ognuna delle 4 regioni individuate nello studio in oggetto. Per quanto qui di interesse, nello studio "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012" la previsione quantitativa dei valori estremi di pioggia in un determinato punto è stata effettuata anche attraverso la determinazione della curva o linea segnalatrice di probabilità pluviometrica (LSPP), cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla sua durata, per un assegnato tempo di ritorno.

La LSPP può essere comunemente descritta da una legge di potenza del tipo:

$$h(t) = a t^n$$

con:

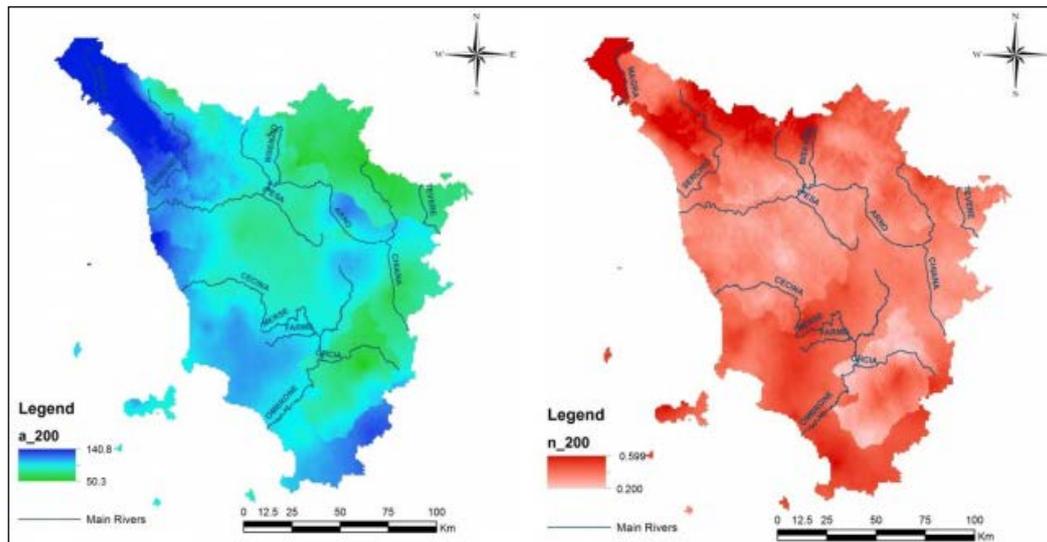
$h$  = altezza di pioggia [mm]

$t$  = durata [ore]

$a$  e  $n$  parametri caratteristici per i tempi di ritorno considerati.

Note le altezze di pioggia per durate e tempi di ritorno fissati, attraverso una regressione logaritmica è possibile determinare le griglie di 1 km su tutta la regione dei parametri  $a$  e  $n$ .

Tra i risultati dello studio, disponibili sul sito Servizio Idrologico Regionale - Centro Funzionale Regionale di Monitoraggio Meteo - Idrologico, sono riportati i valori delle coppie di ASCII Grid di  $a$  e di  $n$  delle LSPP per i diversi tempi di ritorno fissati (30 e 200 nel caso in esame, Figura 4.2).



**Figura 4.2** - Spazializzazione sull'intera regione dei parametri "a" ( sinistra) e "n" ( destra) della LSPP per Tr 200 anni. - "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012"

Nel presente studio idrologico-idraulico i parametri  $a$  e  $n$ , così come riportati dallo studio "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012", ed utilizzati per il calcolo degli afflussi meteorici, sono stati determinati mediante la procedura sintetizzata di seguito per il bacino idrografico relativo alla sezione di chiusura finale in loc. Ponte a Tressa:

1. sono state scaricate le mappe in formato ASCII Grid dei valori  $a$  e  $n$  delle LSPP per i diversi tempi di ritorno disponibili dal sito della Regione Toscana [http://www.sir.toscana.it/supports/download/lsp\\_2012.pdf](http://www.sir.toscana.it/supports/download/lsp_2012.pdf);
2. è stato individuato, sulla cartografia a disposizione, il bacino imbrifero di interesse e ne è stato creato un file apposito;
3. è stata estratta la parte di *raster* dei coefficienti  $a$  e  $n$  associata al bacino oggetto di studio, da cui a questo punto è stato possibile ottenerne i valori medi.

Il risultato di queste operazioni è riportato in Figura 4.1



| Codice | Bacino idrografico    | Area di tutto il bacino a monte della sezione di chiusura (km <sup>2</sup> ) | a200 (mm/h <sup>n</sup> ) | n200 (-) | a30 (mm/h <sup>n</sup> ) | n30 (-) |
|--------|-----------------------|--|---------------------------|----------|--------------------------|---------|
| AR10   | A valle del T. Tressa | 351.7  | 55.279                    | 0.261    | 76.891                   | 0.323   |

Tabella 4.1 - Calcolo delle LSPP

#### 4.1.2 Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica areali

Le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica, ottenute mediante il metodo precedentemente descritto, hanno validità locale e non possono quindi essere adottate per un intero bacino.

E' noto che le piogge di elevata intensità si concentrano in aree piccole e che, a parità di durata e di tempo di ritorno, l'altezza di pioggia decresce con l'area. Su tali basi l'altezza di pioggia media su un bacino si determina moltiplicando l'altezza di pioggia puntuale relativa al bacino stesso per un opportuno coefficiente di riduzione (o coefficiente di ragguglio all'area) che dipende principalmente dall'area del bacino, dal tempo di ritorno e dalla durata. L'uso di tale coefficiente di riduzione implica che il regime delle precipitazioni sia alquanto uniforme per l'intero bacino.

Al fine di tenere conto della variabilità spaziale delle piogge l'input pluviometrico è pertanto stato raggugliato al bacino per mezzo di un coefficiente  $K_r$  di tipo "globale" secondo la:

$$K_r = 1 - e^{\alpha \cdot t^\beta} + e^{\alpha \cdot t^\beta - \gamma \cdot A}$$

Dove:

- $\alpha = 0.036a$ ,
- $\beta = 0.25$
- $\gamma = 0.01$ ,
- $t$  [h] è la durata della precipitazione e
- $A$  [km<sup>2</sup>] è l'area del bacino,
- $a$  è il parametro della formula trinomia delle LSPP.

Il valore del coefficiente di ragguglio delle piogge è indagato per valori corrispondenti a 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 ore.

Per approfondire l'analisi del coefficiente  $K_r$  di ragguglio areale, il valore  $\alpha = 0.036a$  è stato calcolato aggiornando il parametro "a" della forma trinomia delle LSPP tramite una regressione lineare multiparametro considerando le altezze di pioggia aggiornate a seguito dello studio "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012" (set di valori utilizzati:  $T_{r30}$ , 50, 100, 200, 500; durate di pioggia 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 11, 12 ore).



Valore parametro “a” (per eventi con durata di pioggia maggiore a 1 ora) pre 2012: 25.047; valore parametro “a” (per eventi con durata di pioggia maggiore a 1 ora) post 2012: 25.33.

Di seguito sono mostrati i risultati:

| Valori di Kr calcolati con parametro $\alpha=0.036*25.33=0.912$ post 2012 |                       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bacino  | Durata di pioggia (h) |       |       |       |       |       |       |       |
|   | 5                     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| AR04  | 0.798                 | 0.810 | 0.821 | 0.830 | 0.837 | 0.844 | 0.850 | 0.855 |
| AR05  | 0.790                 | 0.803 | 0.814 | 0.823 | 0.831 | 0.838 | 0.844 | 0.850 |
| AR06  | 0.788                 | 0.801 | 0.812 | 0.821 | 0.829 | 0.836 | 0.843 | 0.848 |
| AR07  | 0.768                 | 0.782 | 0.794 | 0.804 | 0.813 | 0.821 | 0.828 | 0.834 |
| AR08  | 0.757                 | 0.772 | 0.785 | 0.795 | 0.805 | 0.813 | 0.820 | 0.826 |
| AR09  | 0.754                 | 0.769 | 0.782 | 0.793 | 0.802 | 0.810 | 0.817 | 0.824 |
| AR10  | 0.752                 | 0.767 | 0.780 | 0.791 | 0.800 | 0.808 | 0.816 | 0.822 |

Tabella 4.2 – valori di Kr calcolati con aggiornamento del parametro a

| Codice | Bacino idrografico       | Tr 30 anni     |                |                |                |                |                |                 |                 |
|--------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|        |                          | h(mm)<br>4 ore | h(mm)<br>5 ore | h(mm)<br>6 ore | h(mm)<br>7 ore | h(mm)<br>8 ore | h(mm)<br>9 ore | h(mm)<br>10 ore | h(mm)<br>11 ore |
| AR04   | A valle del T. Borna     | 62.1           | 67.1           | 71.5           | 75.4           | 78.9           | 82.1           | 85.0            | 87.8            |
| AR05   | A valle del T. Querciola | 61.4           | 66.5           | 70.8           | 74.7           | 78.3           | 81.5           | 84.4            | 87.2            |
| AR06   | A valle del F.so Rigo    | 61.2           | 66.3           | 70.7           | 74.6           | 78.1           | 81.3           | 84.3            | 87.1            |
| AR07   | A valle del T. Malena    | 59.5           | 64.6           | 69.0           | 72.9           | 76.5           | 79.7           | 82.7            | 85.5            |
| AR08   | A valle del T. Bozzone   | 58.6           | 63.7           | 68.1           | 72.1           | 75.6           | 78.9           | 81.9            | 84.7            |
| AR09   | A valle del T. Riluogo   | 58.3           | 63.4           | 67.8           | 71.8           | 75.4           | 78.6           | 81.6            | 84.4            |
| AR10   | A valle del T. Tressa    | 58.1           | 63.2           | 67.7           | 71.6           | 75.2           | 78.4           | 81.5            | 84.3            |

Tabella 4.3 - spessori di pioggia considerati alle varie durate per Tr 30 anni con ragguglio all'area

| Codice | Bacino idrografico       | Tr 200 anni    |                |                |                |                |                |                 |                 |
|--------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|        |                          | h(mm)<br>4 ore | h(mm)<br>5 ore | h(mm)<br>6 ore | h(mm)<br>7 ore | h(mm)<br>8 ore | h(mm)<br>9 ore | h(mm)<br>10 ore | h(mm)<br>11 ore |
| AR04   | A valle del T. Borna     | 94.1           | 103.2          | 111.1          | 118.3          | 124.8          | 130.9          | 136.5           | 141.8           |
| AR05   | A valle del T. Querciola | 93.1           | 102.2          | 110.2          | 117.3          | 123.9          | 129.9          | 135.6           | 140.8           |
| AR06   | A valle del F.so Rigo    | 92.9           | 101.9          | 109.9          | 117.0          | 123.6          | 129.6          | 135.3           | 140.6           |
| AR07   | A valle del T. Malena    | 90.2           | 99.3           | 107.3          | 114.5          | 121.0          | 127.1          | 132.8           | 138.1           |
| AR08   | A valle del T. Bozzone   | 88.9           | 97.9           | 105.9          | 113.1          | 119.7          | 125.8          | 131.4           | 136.8           |
| AR09   | A valle del T. Riluogo   | 88.5           | 97.5           | 105.5          | 112.7          | 119.3          | 125.4          | 131.0           | 136.4           |
| AR10   | A valle del T. Tressa    | 88.1           | 97.2           | 105.2          | 112.4          | 119.0          | 125.1          | 130.7           | 136.1           |

Tabella 4.4 - spessori di pioggia considerati alle varie durate per Tr 200 anni con ragguglio all'area



#### 4.1.3 Ietogramma di progetto

Le LSPP forniscono, per una prefissata durata della pioggia ed un tempo di ritorno, l'intensità media dell'evento, senza però dare indicazioni sulla distribuzione temporale della precipitazione stessa nell'intervallo di tempo considerato. Tale aspetto risulta essere non secondario, poiché la portata defluente in una data sezione di un corso d'acqua dipende (oltre che dalle caratteristiche del bacino idrografico) dalla distribuzione spaziale e dall'andamento temporale della precipitazione, ed in particolare da:

- intensità massima di pioggia all'interno dell'intervallo di tempo  $t$ ;
- posizione del punto di intensità massima;
- volume di precipitazione caduto precedentemente all'istante di intensità massima.

A parità di tempo di ritorno,  $T_r$ , e di durata di pioggia,  $d$ , possono aversi infinite realizzazioni dello ietogramma a ciascuna delle quali sono associate differenti idrogrammi di piena  $Q(t)$ . La sensibilità della risposta del bacino alla forma dello ietogramma è maggiore in bacini piccoli (generalmente di area inferiore a circa 50 Km<sup>2</sup>) o, in generale, in bacini con ridotta capacità di invaso.

La distribuzione nel tempo dello spessore di pioggia fornito dalla LSPP può essere effettuata utilizzando diversi criteri, tra cui i più comunemente utilizzati sono:

- ietogrammi con intensità costante;
- ietogrammi con sequenza di spessori parziali di pioggia su intervalli costanti disposti in analogia alla LSPP;
- ietogrammi con sequenza di spessori parziali di pioggia su intervalli costanti disposti in analogia alla LSPP capovolta e ribaltata;
- ietogrammi a blocchi alterni (Alternating Block Method), in cui gli spessori di pioggia su intervalli costanti ricavati dalle LSPP sono ordinati con il valore massimo al centro dello ietogramma e i rimanenti valori disposti in maniera alternata a destra e sinistra dello stesso.

La risposta di un generico bacino al variare della distribuzione temporale della pioggia, in termini relativi, è pressoché indipendente dal tempo di ritorno e lo ietogramma uniforme, insieme a quello a blocchi alterni, rappresenta una condizione intermedia di criticità.





Per il presente studio, è stato pertanto utilizzato per la trasformazione afflussi deflussi lo ietogramma con intensità costante, caratterizzato da una durata  $t$  ed una intensità costante  $i(t)$  ricavata dalla LSPP con ragguglio all'area.

## 4.2 Pioggia effettiva

Nota la pioggia areale, per la determinazione del deflusso diretto è necessario valutare la pioggia effettiva e, quindi, la quantità di pioggia che viene assorbita dal suolo e quella intercettata dalla vegetazione, mentre la quantità di pioggia persa per evapotraspirazione è trascurabile per eventi meteorici particolarmente intensi. Per effettuare tale stima, è stato applicato il metodo del Curve Number proposto dal Soil Conservation Service. È stato inoltre considerato nullo l'effetto di "ritenzione superficiale" e che tutta l'acqua che potenzialmente potrebbe sostare al di fuori del corso d'acqua, partecipi effettivamente al deflusso all'interno dello stesso.

### 4.2.1 Modello di infiltrazione - Metodo SCS-CN

La predisposizione dei suoli a contribuire ai deflussi di piena è determinata fondamentalmente da tre fattori:

- Dalle caratteristiche di permeabilità dei terreni superficiali e degli strati geologici immediatamente sottostanti;
- Dall'uso dei suoli e dalla copertura vegetale;
- Dallo stato di imbibimento dei suoli all'inizio della sollecitazione meteorica.

L'effetto di questi fattori sulla capacità di ritenzione del terreno viene sintetizzata efficientemente nel modello di infiltrazione del terreno messo a punto dal Soil Conservation Service (1972) degli Stati Uniti. Questo metodo viene largamente adottato perché consente, attraverso informazioni quantitative sulla natura del bacino di facile acquisizione, di valutare le grandezze di interesse anche per bacini non strumentati. Secondo il metodo SCS-CN, il volume di deflusso superficiale (altezza di pioggia effettiva),  $E^A$ , per un evento isolato di piena è dato da:

$$E^A = \frac{(R^A - I_a)^2}{R^A - I_a + S} \quad (4.1)$$

essendo  $R^A$  lo spessore di pioggia precipitato sul bacino,  $S$  lo spessore di massima ritenzione potenziale del terreno e  $I_a = c S$ , lo spessore di assorbimento iniziale, con  $0 \leq c < 1$ . L'assorbimento iniziale  $I_a$  rappresenta il volume specifico di pioggia sottratto a priori per l'intercettazione della vegetazione e l'accumulo nelle depressioni superficiali e, come si può intuire, risulta difficilmente





valutabile. Sulla base di dati sperimentali relativi a numerosi bacini statunitensi, il Soil Conservation Service ha suggerito per la stima di  $I_a$  un valore di  $c=0.2$ .

Per un fissato stato iniziale di imbibimento, la massima ritenzione potenziale del bacino è funzione del tipo di terreno e dell'uso del suolo, il cui effetto combinato è descritto globalmente dal parametro adimensionale CN,  $0 < CN < 100$ , legato ad S dalla relazione:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4.2)$$

dove S è espresso in mm. Per determinare il valore del CN è necessario conoscere il tipo e l'uso del suolo, nonché il grado iniziale di imbibimento del terreno che può essere di tre tipi: AMC Tipo I, in caso di bacino asciutto, AMC Tipo II, per condizioni intermedie, e AMC Tipo III, in caso di bacino fortemente imbibito.

Lo stato di imbibimento viene individuato, in modo quali-quantitativo, in funzione dell'indice di pioggia API<sub>5</sub> (Antecedent Precipitation Index), ovvero la pioggia totale caduta nei cinque giorni che precedono l'evento di piena. E' stato però ben evidenziato che tale criterio non presenta particolare affidabilità per la realtà italiana (Borselli, 1989; Melone et. al., 2001; Brocca et al., 2008a; 2008b; 2008c). Cautelativamente si fa quindi riferimento alla condizione di Tipo III.

In funzione delle caratteristiche idrologiche, i suoli possono essere suddivisi in quattro classi di permeabilità (A, B, C e D); in Tabella 4.5 sono descritte tali categorie dalla A alla D con potenzialità di deflusso crescente (Chow et al., 1988), mentre in Tabella 4.6 sono riportati i valori di CN per condizioni iniziali intermedie, AMC Tipo II, in funzione del tipo di suolo e dell'uso del suolo stesso.

| Gruppo | Descrizione   |
|--------|---|
| A      | Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla; anche ghiaie profonde  |
| B      | Potenzialità di deflusso moderatamente bassa. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione. |
| C      | Potenzialità di deflusso moderatamente alta. Comprende suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se meno che nel gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità d'infiltrazione a saturazione.   |
| D      | Potenzialità di deflusso molto alta. Comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie.          |

**Tabella 4.5** - Descrizione delle categorie dei tipi di suolo in base al metodo del Soil Conservation Service (1986).



| Tipo di Copertura   | Tipo di Suolo |    |    |    |
|---|---------------|----|----|----|
|   | A             | B  | C  | D  |
| <i>Terreno coltivato</i><br>Senza trattamenti di conservazione<br>Con interventi di conservazione   | 72            | 81 | 88 | 91 |
|   | 62            | 71 | 78 | 81 |
| <i>Terreno da pascolo</i><br>Cattive condizioni<br>Buone condizioni   | 68            | 79 | 86 | 89 |
|   | 39            | 61 | 74 | 80 |
| <i>Praterie</i><br>Buone condizioni   | 30            | 58 | 71 | 78 |
| <i>Terreni boscosi o forestati</i><br>Terreno sottile, sottobosco povero, senza foglie<br>Sottobosco e copertura buoni  | 45            | 66 | 77 | 83 |
|   | 25            | 55 | 70 | 77 |
| <i>Spazi aperti, prati rasati, parchi</i><br>Buone condizioni con almeno il 75% dell'area con copertura erbosa<br>Condizioni normali, con copertura erbosa intorno al 50% | 39            | 61 | 74 | 80 |
|   | 49            | 69 | 79 | 84 |
| <i>Aree commerciali (impermeabilità 85%)</i>  | 89            | 92 | 94 | 95 |
| <i>Distretti industriali (impermeabilità 72%)</i>   | 81            | 88 | 91 | 93 |
| <i>Aree residenziali (impermeabilità media %)</i><br>65%<br>38%<br>30%<br>25%<br>20%  | 77            | 85 | 90 | 92 |
|   | 61            | 75 | 83 | 87 |
|   | 57            | 72 | 81 | 86 |
|   | 54            | 70 | 80 | 85 |
|   | 51            | 68 | 79 | 84 |
| <i>Parcheggi impermeabilizzati, tetti</i>   | 98            | 98 | 98 | 98 |
| <i>Strade</i><br>Pavimentate, con cordoli e fognature<br>Inghiaiate o selciate e con buche<br>In terra battuta (non asfaltate)  | 98            | 98 | 98 | 98 |
|   | 76            | 85 | 89 | 91 |
|   | 72            | 82 | 87 | 89 |

Tabella 4.6 - Valori di CN II per condizioni intermedie in funzione del tipo di suolo e del tipo di copertura.



Nel caso in cui nel bacino siano presenti differenti tipi di terreno o questo sia utilizzato in differenti modi, si ricorre ad un valore medio di CN. Come suggerito da Mancini e Rosso (1989), si utilizza il valore medio a scala di bacino del parametro S, mediante un'integrazione spaziale dei valori puntuali, anziché un'integrazione dei valori di CN a causa della non linearità dell'eq. (4.2) che lega i due parametri. Quindi si ha:

$$\bar{S} = \frac{S_1 A_1 + S_2 A_2 + \dots + S_i A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_i} \quad (4.3)$$

dove  $S_i$  rappresenta il valore di S per l'area omogenea  $A_i$ .

Una volta nota  $\bar{S}$ , l'eq. (4.3) permette di calcolare la pioggia effettiva media areale dell'intero evento ma non fornisce il suo andamento temporale, che può essere ottenuto dalla:

$$e^A(t) = \frac{dE^A}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{(R^A - 0.2S)^2}{R^A + 0.8S} \right) \quad (4.4)$$

L'eq. (4.4) è valida sotto la condizione  $R^A > I_a$ ; fino a quando non è verificata tale condizione si pone  $e^A(t) = 0$ .

Nella pratica per risolvere la (4.4) a partire da un ietogramma di pioggia discreto  $r_1, r_2, \dots$  si valuta ad ogni passo temporale  $t_m$  ( $t_m = m\Delta t$ ;  $m=1, 2, \dots$ ) il valore del volume incrementale di ruscellamento (o pioggia netta),  $E_m$ , come:

$$E_m = \begin{cases} 0 & \text{se } R_m < 0.2S \\ \frac{(R_m - cS)^2}{R_m} + (1-c)S & \text{se } R_m > 0.2S \end{cases} \quad (4.5)$$

dove il valore della pioggia lorda cumulata,  $R_m$ , è dato da:

$$R_m = \sum_{i=1}^m r_i \quad (4.6)$$

e per semplicità è stato tralasciato l'apice A per indicare quantità riferite all'area del bacino.

In base al valore di  $E_m$  si ricava quindi  $\Delta E_m = E_m - E_{m-1}$ . Il tasso di ruscellamento  $e_m$  durante l'intervallo m-esimo è:

$$e_m = \Delta E_m / \Delta t \quad (4.7)$$



#### 4.2.2 Determinazione del CN III

L'individuazione del valore CNII (condizione di terreno mediamente imbibito) si è basata sull'Accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012, per cui è avvenuto un processo di aggiornamento del modello Idrologico distribuito sviluppato dal Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale in uso presso il Centro Funzionale della Regione Toscana per la previsione degli eventi di piena in tempo reale. Tra i parametri sviluppati rientrano i valori di Curve Number a partire dalla pedologia e dall'uso del suolo.

Il risultato che si ottiene, desunto dall'archivio della Regione Toscana, è riportato nella Figura 4.5.

Procedendo come esposto nel paragrafo 4.2.1 è possibile individuare il valore del CN a livello di singolo bacino idrografico. In realtà, l'applicazione della precedente formula 4.3 è stata riferita al valore del CNIII (condizione di terreno imbibito), ottenuto dal valore del CNII secondo l'espressione che segue:

$$CN(III) = \frac{CN(II)}{[0.43 + 0.0057 * CN(II)]}$$

A questo punto il valore del *Curve Number III* è definito e riportato in Tabella 4.7 per i vari bacini.



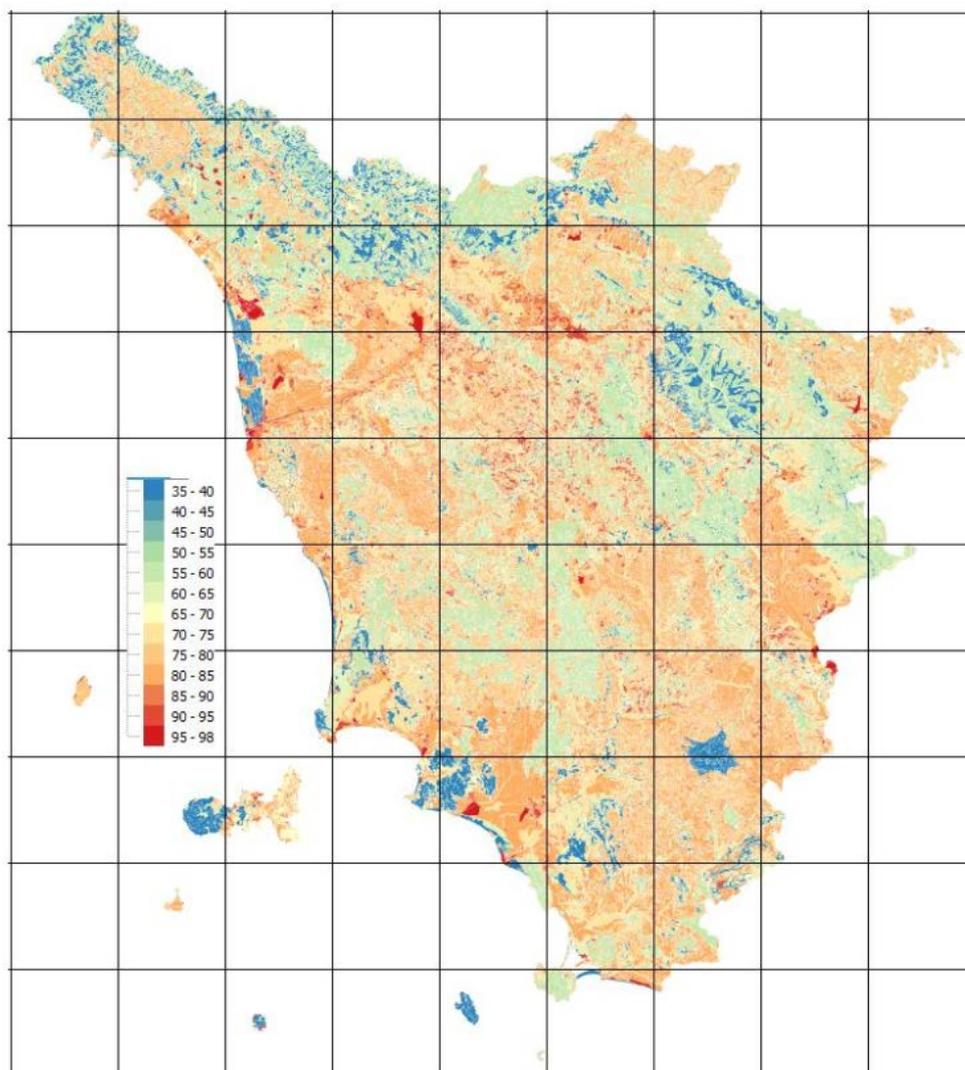


Figura 4.3 – Valori di Curve Number – CNII per la Toscana

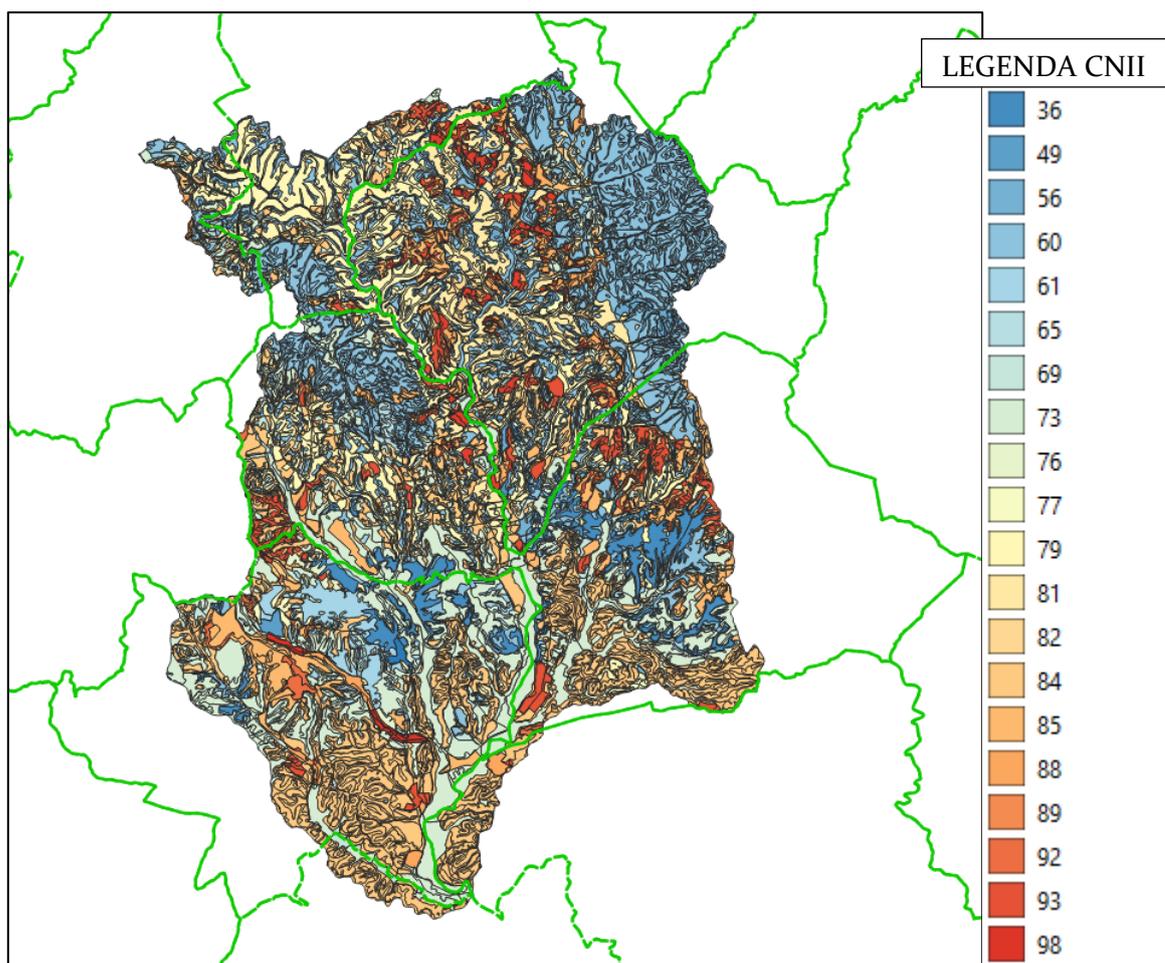


Figura 4.4 - Valori di CNII assunti per i vari bacini

### 4.3 Portate di progetto. Trasformazione afflussi/deflussi

Nel vasto panorama dei modelli di formazione dei deflussi, che si propongono di rappresentare matematicamente i processi idrologici che si manifestano in un bacino idrografico descrivendone il comportamento con un operatore che lega la funzione di distribuzione temporale delle piogge effettive (ingresso al sistema) ed il corrispondente idrogramma dei deflussi diretti (risposta del sistema), è stata scelta la metodologia basata sull'idrogramma unitario istantaneo (IUH). Il metodo si basa sulle ipotesi di linearità e stazionarietà del bacino ed effettua la combinazione tra pioggia in ingresso e IUH per il calcolo della portata diretta. In altre parole, la risposta  $Q(t)$  ad una sollecitazione meteorica di intensità  $p(t)$  variabile nel tempo, ma supposta costante su tutti i punti del bacino, è data dall'integrale di convoluzione:

$$Q(t) = \int_0^t p(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

dove  $p(t)=A i(t)$  è la portata di afflusso meteorico al generico tempo  $t$  e la funzione  $h(t)$ , che prende il nome di IUH, è definita come l'idrogramma dei deflussi generato da un'ipotetica pioggia efficace di altezza unitaria ed intensità costante, distribuita uniformemente sul bacino, e caduta in un intervallo di tempo unitario (immissione di tipo impulsivo).

#### 4.3.1 Modello SCS Idrogramma Unitario

La funzione  $h(t)$  può essere stimata mediante numerosi approcci, tra cui l'idrogramma unitario del SCS (quello scelto per il presente studio).

L'idrogramma SCS è un idrogramma adimensionale definito dal SCS in base all'analisi di idrogrammi di piena in uscita dalla sezione di chiusura di numerosi bacini idrografici strumentati, di dimensioni grandi e piccole. Esso ha un vasto campo di applicazioni pratiche nel campo delle trasformazioni afflussi deflussi per la sua semplicità d'uso e per la sua generalità. Questo IUH è adimensionalizzato rispetto al valore della portata di picco e del tempo corrispondente alla durata del ramo ascendente dell'idrogramma stesso.

L'approccio proposto dal SCS può essere impiegato purché si definisca il valore del *lag time* (tempo di ritardo del bacino) e il *peak rate factor* (PRF). Mentre il primo è comunemente definito sulla base di formule empiriche, il secondo deve essere scelto in funzione delle caratteristiche geomorfologiche del bacino e caratteristico del metodo impiegato. Il PRF è definito dalla seguente relazione

$$q_p = PRF \frac{AQ}{T_p}$$

intendendo per  $q_p$  la portata di picco in [ft<sup>3</sup>/s],  $A$  l'area di drenaggio in [mi<sup>2</sup>] e  $T_p$  il tempo in cui si realizza il picco in [h],  $Q$  runoff (in). Il valore di *default* proposto da HEC-HMS è di assumere PRF pari a 484 ed è definito ipotizzando che il volume trasportato dall'idrogramma di piena nel tratto ascendente è il 35% di quello totale. Quindi la scelta del PRF si riflette in un cambiamento percentuale del volume trasportato nel tratto ascendente dell'idrogramma di piena e, quindi, della sua forma. Ai fini del presente studio, si assume il valore del PRF costante e pari a 484 come quello di default.



#### 4.3.2 Stima del lag time

Il *lag time* (o tempo di ritardo) è normalmente stimato per mezzo di relazioni empiriche. Nel caso in esame sono state prese in esame 9 diverse formulazioni da letteratura del Lag Time, ovvero le formule di Kirpich, Kerby-Hataway, Papadakis-Kazan, Watt & Chow, Chow, Melone, Fiorentino, McEnroe & Zhao, SCS, con l'aggiunta di ulteriori 4 formule per il calcolo del tempo di corrivazione: Giandotti, Puglisi, Aronica & Paltrinieri, Fattorelli & Marchi,. La correlazione tra il Tempo di Corrivazione ( $t_c$ ) e il Lag-Time ( $T_{lag}$ ) è dato da  $T_{lag} = 0.6 * t_c$ .

In generale le formule adottate si basano su dati morfologici come l'area del bacino, la lunghezza dell'asta principale, le quote del bacino idrografico, coefficienti che valutano la permeabilità del suolo e la velocità di ruscellamento dell'acqua.

Avere a disposizione una così ampia serie di dati permette di eliminare i valori estremi dovuti al non adattamento della formula per quel dato bacino (dovuto principalmente alle dimensioni e alla morfologia), dai valori validati ne è stata estratta la media.

#### 4.3.3 Risultati della modellazione idrologica

Il software HEC-HMS ver. 4.2.1 è il sistema d'analisi dei fiumi dell'Hydrologic Engineering Center (HEC), del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America. E' stato progettato per simulare i processi di precipitazione e di deflussi di bacini idrografici e ne consente, quindi, la modellazione idrologica.

Per eseguire una simulazione idrologica il software richiede la specificazione di tre insiemi di dati:

- Basin Model: rappresentazione fisica delle caratteristiche del bacino idrografico
- Meteorologic Model: dati meteorologici relativi alle precipitazioni e all'evapotraspirazione
- Control Specifications, Time-Series Data: informazioni temporali necessarie per la simulazione

Il componente *Basin Model* permette di definire i bacini idrografici, le relative caratteristiche, i metodi di calcolo delle perdite di bacino e i metodi di calcolo della trasformazione afflussi-deflussi.

Il *meteorological model* definisce l'evento pluviometrico di progetto (*rainfall simulation*). L'evento pluviometrico assegnato, è inserito, nel caso in esame, utilizzando il metodo dello *specified hyetograph*, inserendo cioè uno ietogramma di pioggia costante per tutta la durata dell'evento. Per le simulazioni idrologiche si è scelto, quindi, di distribuire i valori dello spessore di pioggia in 1 ora, ipotizzando, come già detto, lo ietogramma costante.





Ogni bacino è stato definito a partire dalle seguenti caratteristiche: Area del bacino, SCS Curve Number come *Loss Method* e SCS Unit Hydrograph come *Transformation Method*.

I risultati delle analisi idrologiche in termini di valore dei picchi degli idrogrammi sono infine riportate in Tabella 4.7 per tutti i bacini oggetto di studio.

| Codice | Bacino idrografico       | Area [km <sup>2</sup> ] | CNIII | Lag [min] |
|--------|--------------------------|-------------------------|-------|-----------|
| AR04   | A valle del T. Borna     | 156.1                   | 83    | 204       |
| AR05   | A valle del T. Querciola | 171.3                   | 84    | 243       |
| AR06   | A valle del F.so Rigo    | 176.2                   | 84    | 246       |
| AR07   | A valle del T. Malena    | 237.7                   | 83    | 269       |
| AR08   | A valle del T. Bozzone   | 293.6                   | 83    | 277       |
| AR09   | A valle del T. Riluogo   | 324.4                   | 84    | 303       |
| AR10   | A valle del T. Tressa    | 351.7                   | 84    | 304       |

Tabella 4.7 - Risultati della modellazione idrologica

| Codice | Bacino idrografico       | Tr30 – Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s] |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|--------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |                          | D=5h  | D=6h  | D=7h  | D=8h  | D=9h  | D=10h | D=11h | D=12h |
| AR04   | A valle del T. Borna     | 238.3                                       | 247.9 | 251.7 | 252.1 | 249.8 | 245.6 | 240.8 | 235.3 |
| AR05   | A valle del T. Querciola | 238   | 251.1 | 258.3 | 260.9 | 260.8 | 258.6 | 255.5 | 250.9 |
| AR06   | A valle del F.so Rigo    | 241.6                                       | 255.2 | 262.6 | 265.8 | 265.9 | 264.3 | 260.7 | 256.6 |
| AR07   | A valle del T. Malena    | 276.5                                       | 296.9 | 310.3 | 318.1 | 321.9 | 322.4 | 320.8 | 317.8 |
| AR08   | A valle del T. Bozzone   | 328.7                                       | 354.7 | 372.1 | 383.1 | 388.7 | 391   | 390.2 | 387.7 |
| AR09   | A valle del T. Riluogo   | 348.8                                       | 378.1 | 398.4 | 411.2 | 419.1 | 421.9 | 422.8 | 420.9 |
| AR10   | A valle del T. Tressa    | 375.1                                       | 407.1 | 428.9 | 443.4 | 451.1 | 455.8 | 456   | 453.9 |

Tabella 4.8 – risultati della modellazione idrologica, valori di portata massima per Tr30 riferita alla sezione di chiusura di ogni bacino considerato

| Codice | Bacino idrografico       | Tr200 – Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s] |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|--------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |                          | D=5h   | D=6h  | D=7h  | D=8h  | D=9h  | D=10h | D=11h | D=12h |
| AR04   | A valle del T. Borna     | 464.9  | 479.9 | 484.4 | 481.7 | 475   | 465.6 | 454.6 | 442.3 |
| AR05   | A valle del T. Querciola | 461.7  | 484   | 494.7 | 497.6 | 495.7 | 489.8 | 481.3 | 471.7 |
| AR06   | A valle del F.so Rigo    | 468.8  | 492.2 | 503.9 | 507.5 | 506   | 500.3 | 492.3 | 482.8 |
| AR07   | A valle del T. Malena    | 550.6  | 587.5 | 609.7 | 621.3 | 625.2 | 624.2 | 618.5 | 610.5 |
| AR08   | A valle del T. Bozzone   | 657.4  | 705.2 | 735.2 | 751.7 | 759.3 | 758.9 | 754.4 | 746   |
| AR09   | A valle del T. Riluogo   | 689  | 742.4 | 778   | 799.3 | 810.1 | 813   | 811.3 | 804.4 |
| AR10   | A valle del T. Tressa    | 741.6  | 799.7 | 838.7 | 861.8 | 874.3 | 877.5 | 875.7 | 869.2 |

Tabella 4.9 – risultati della modellazione idrologica, valori di portata massima per Tr200 riferita alla sezione di chiusura di ogni bacino considerato

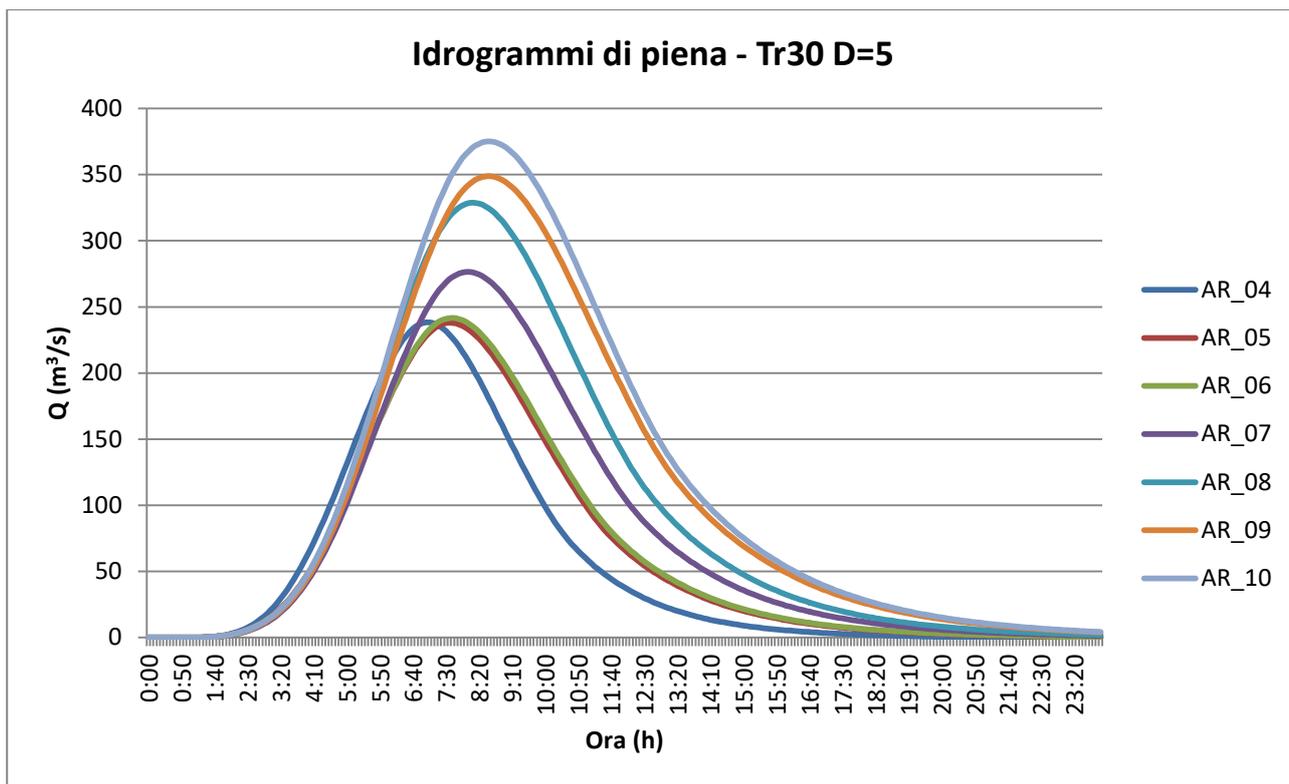


Figura 4.5 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, durata di pioggia 5 ore riferiti ad ogni bacino indagato

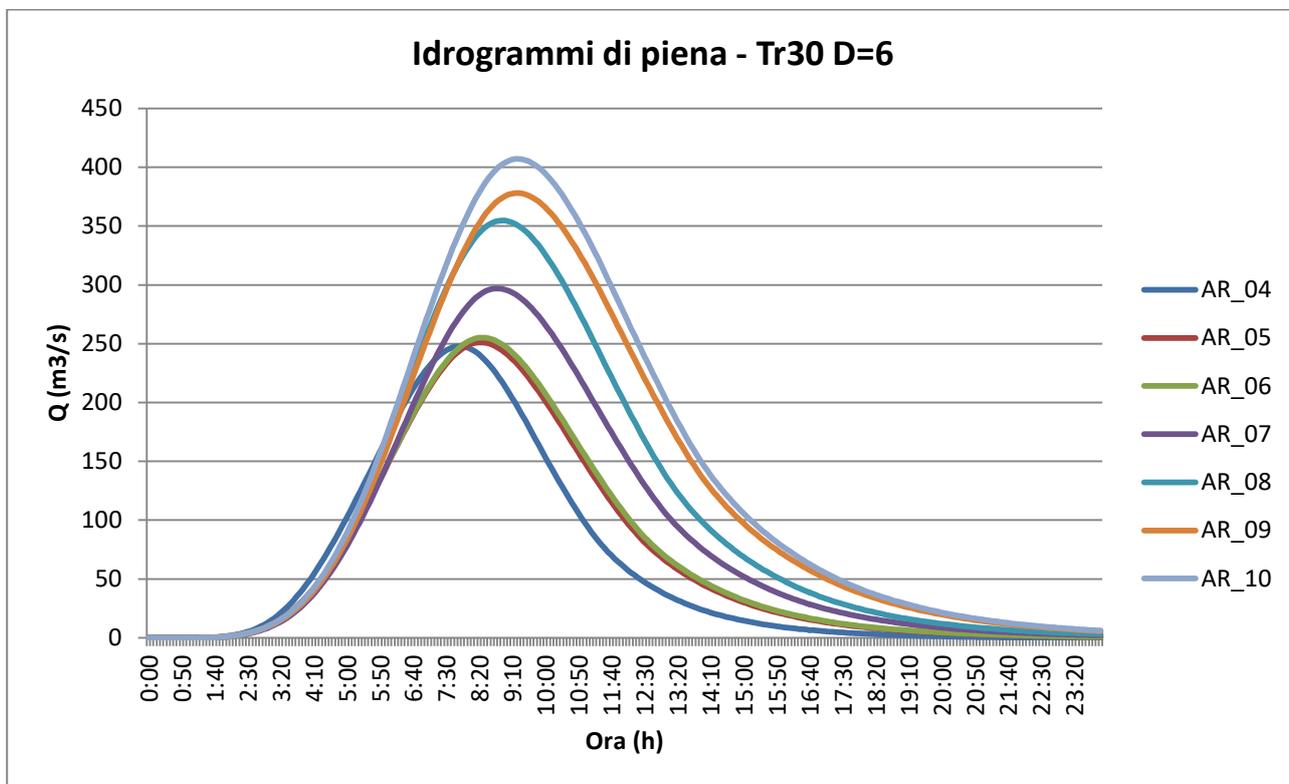


Figura 4.6 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, durata di pioggia 6 ore riferiti ad ogni bacino indagato

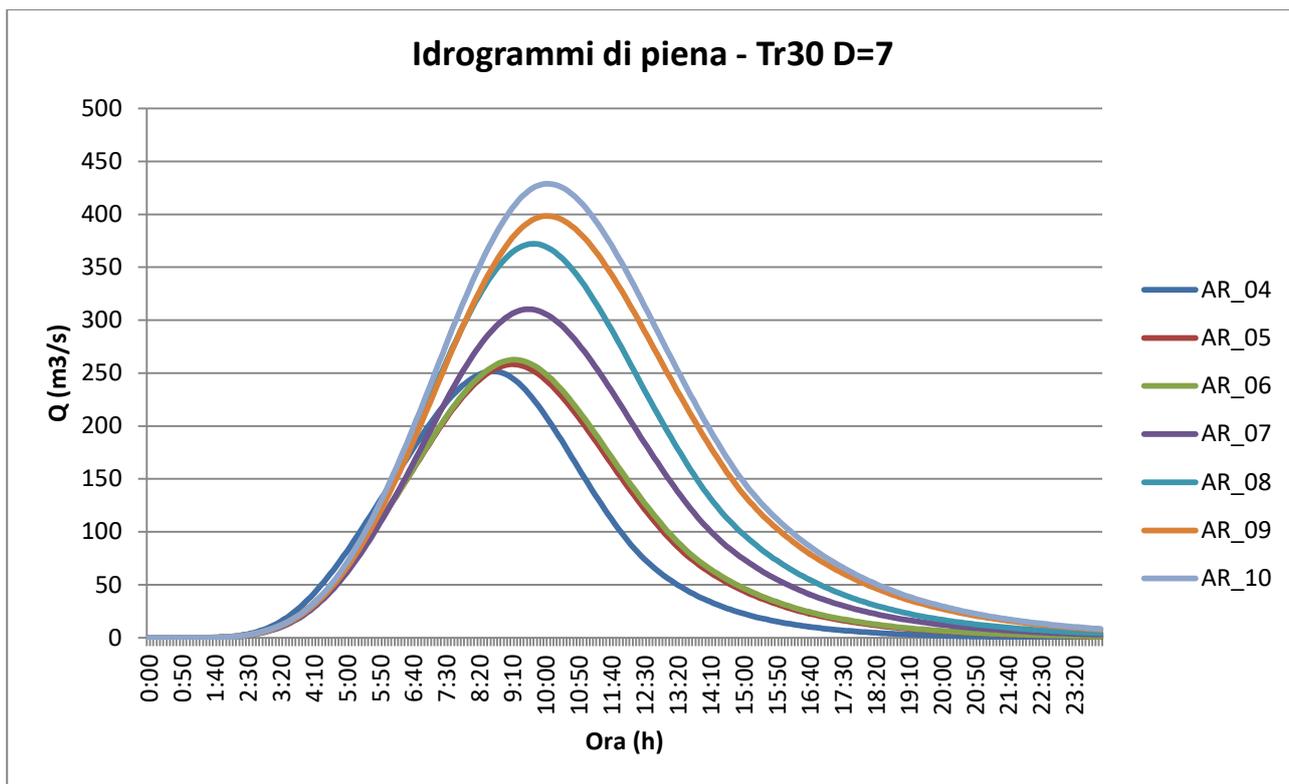


Figura 4.7 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, durata di pioggia 7 ore riferiti ad ogni bacino indagato

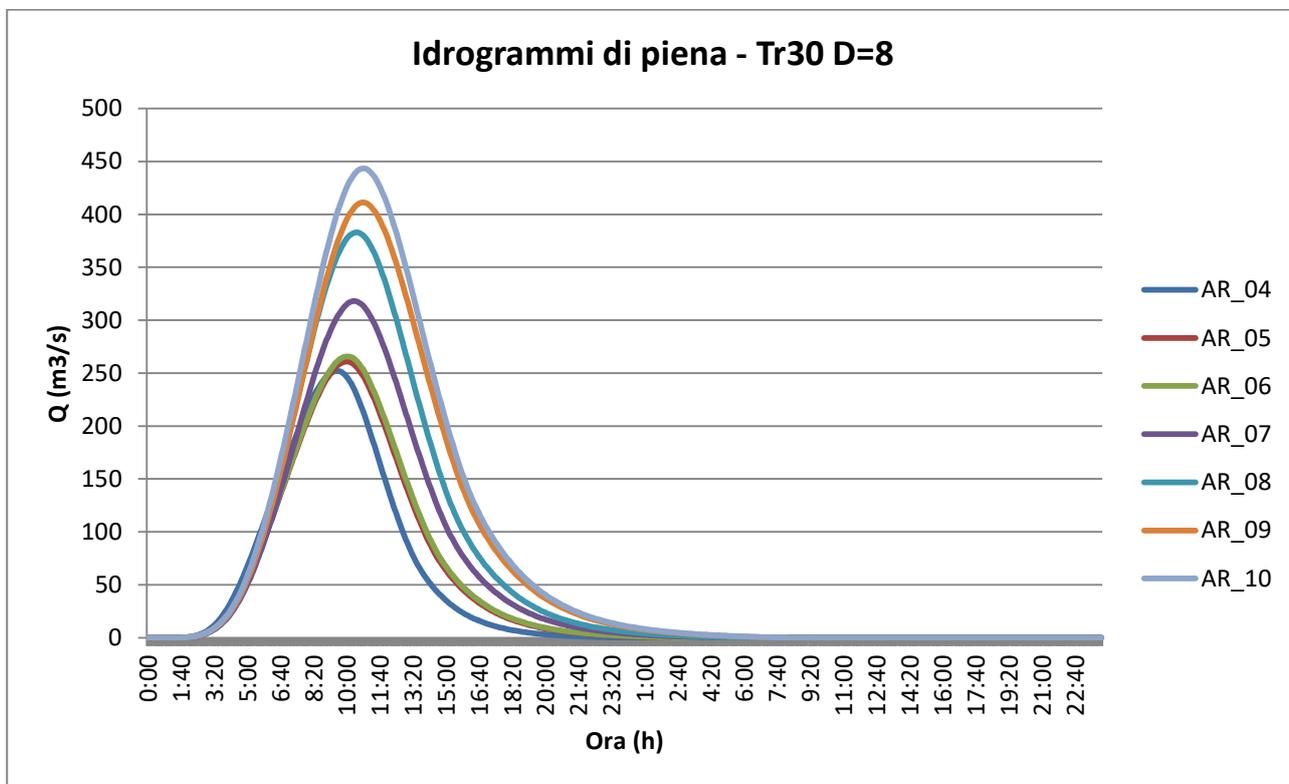


Figura 4.8 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, durata di pioggia 8 ore riferiti ad ogni bacino indagato

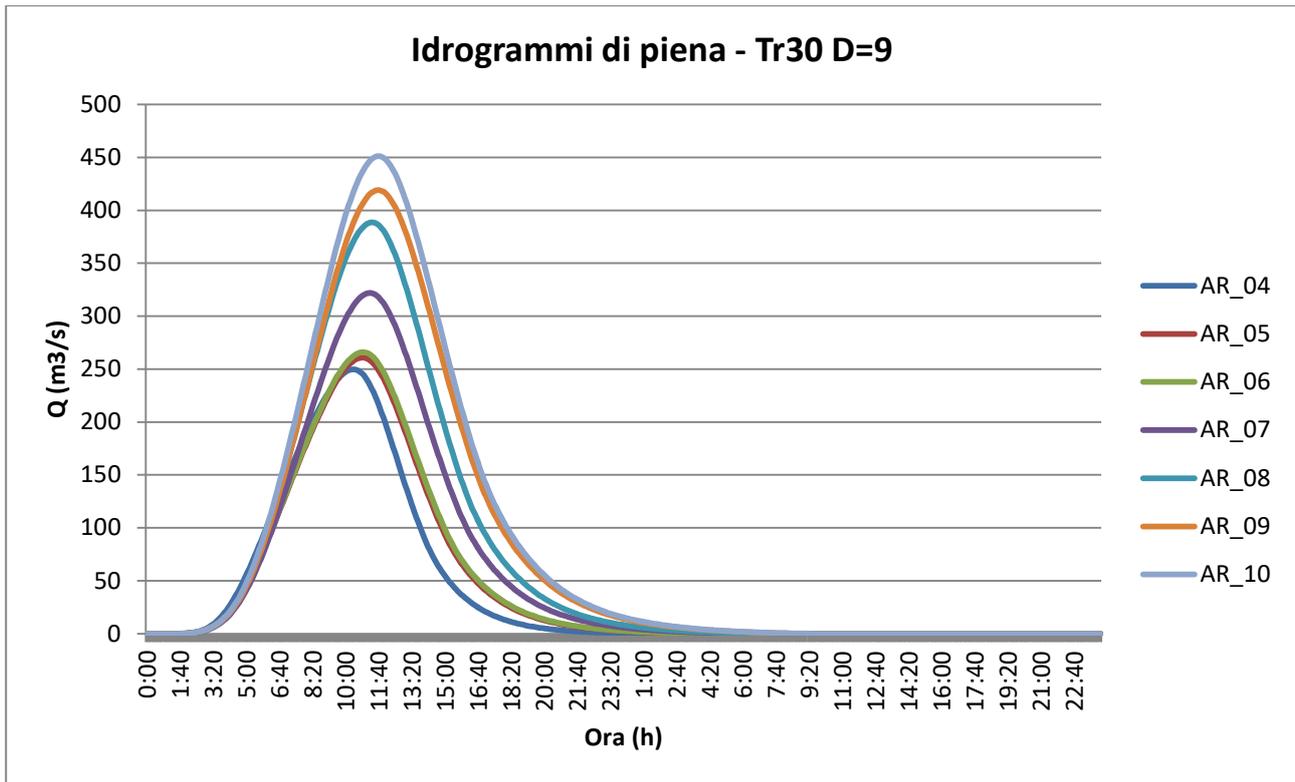


Figura 4.9 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, durata di pioggia 9 ore riferiti ad ogni bacino indagato

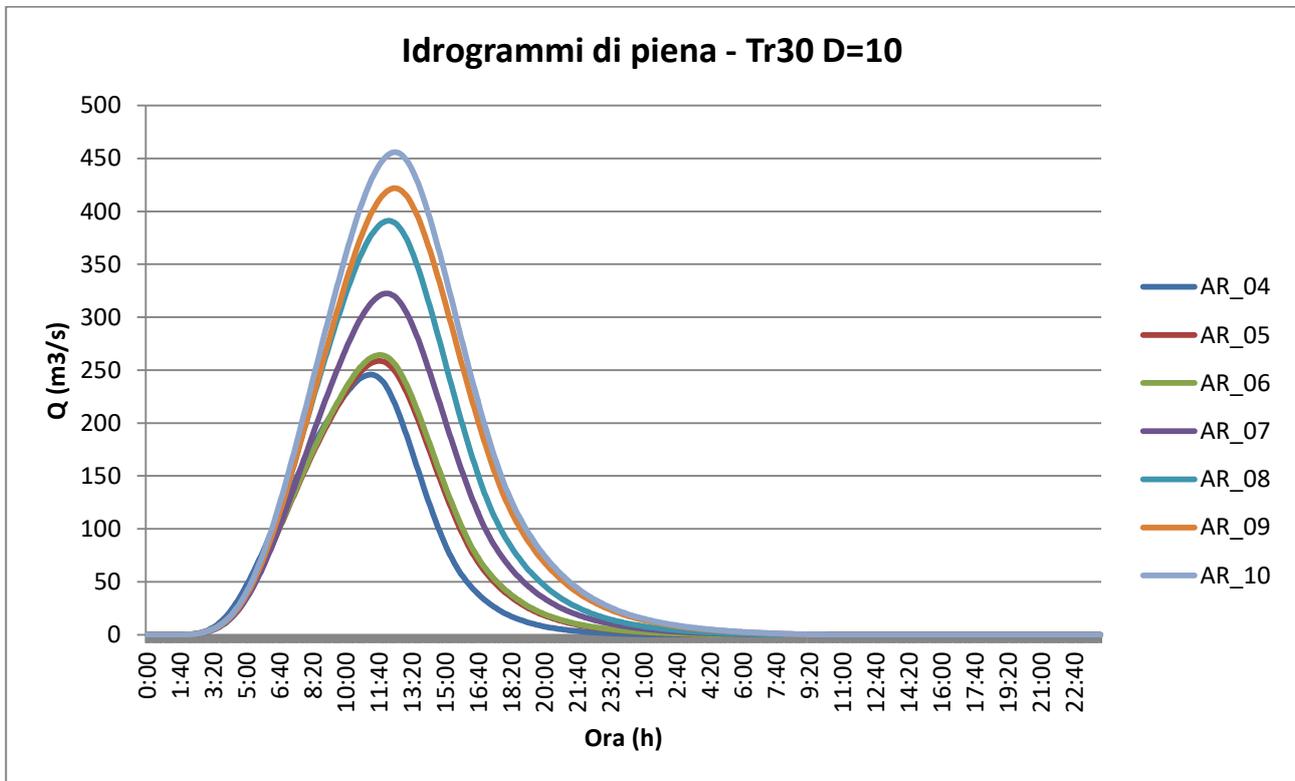


Figura 4.10 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, durata di pioggia 10 ore riferiti ad ogni bacino indagato

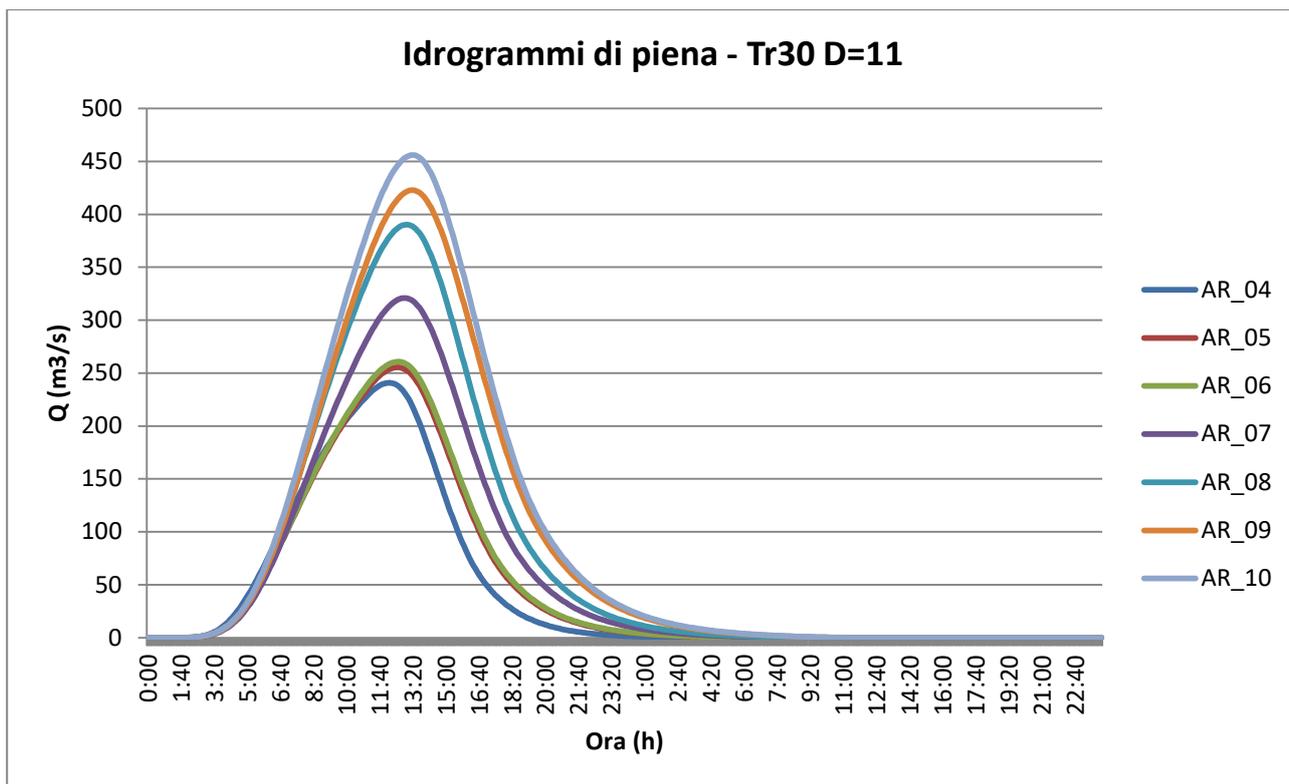


Figura 4.11 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, durata di pioggia 11 ore riferiti ad ogni bacino indagato

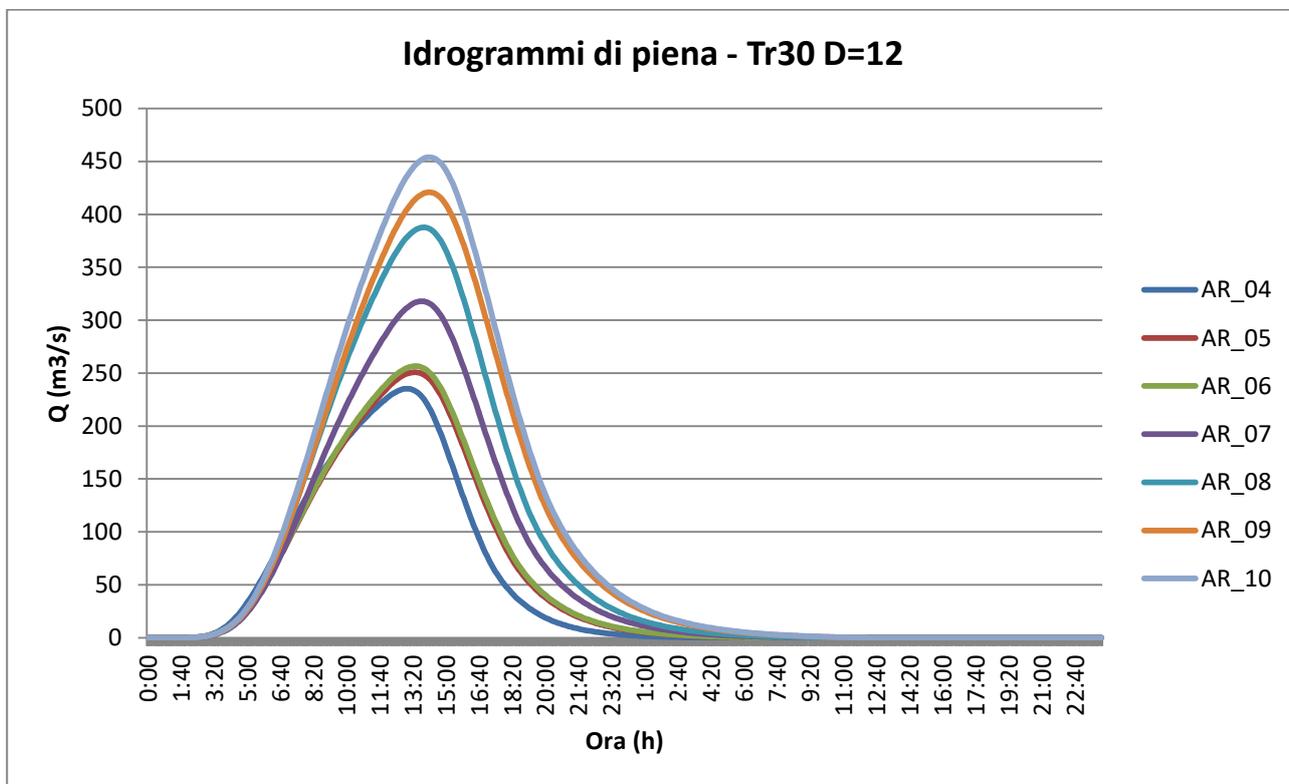


Figura 4.12 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, durata di pioggia 11 ore riferiti ad ogni bacino indagato

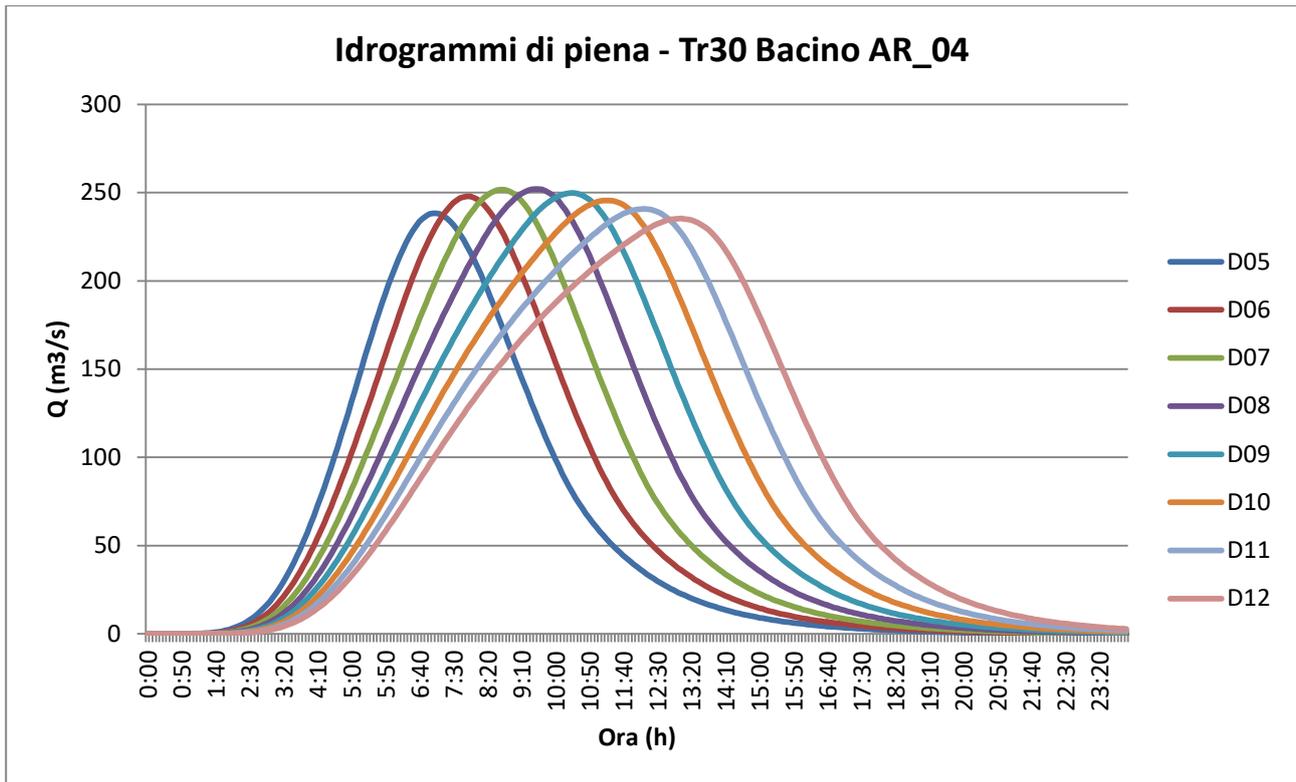


Figura 4.13 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, bacino AR\_04 indagato per ogni durata di pioggia

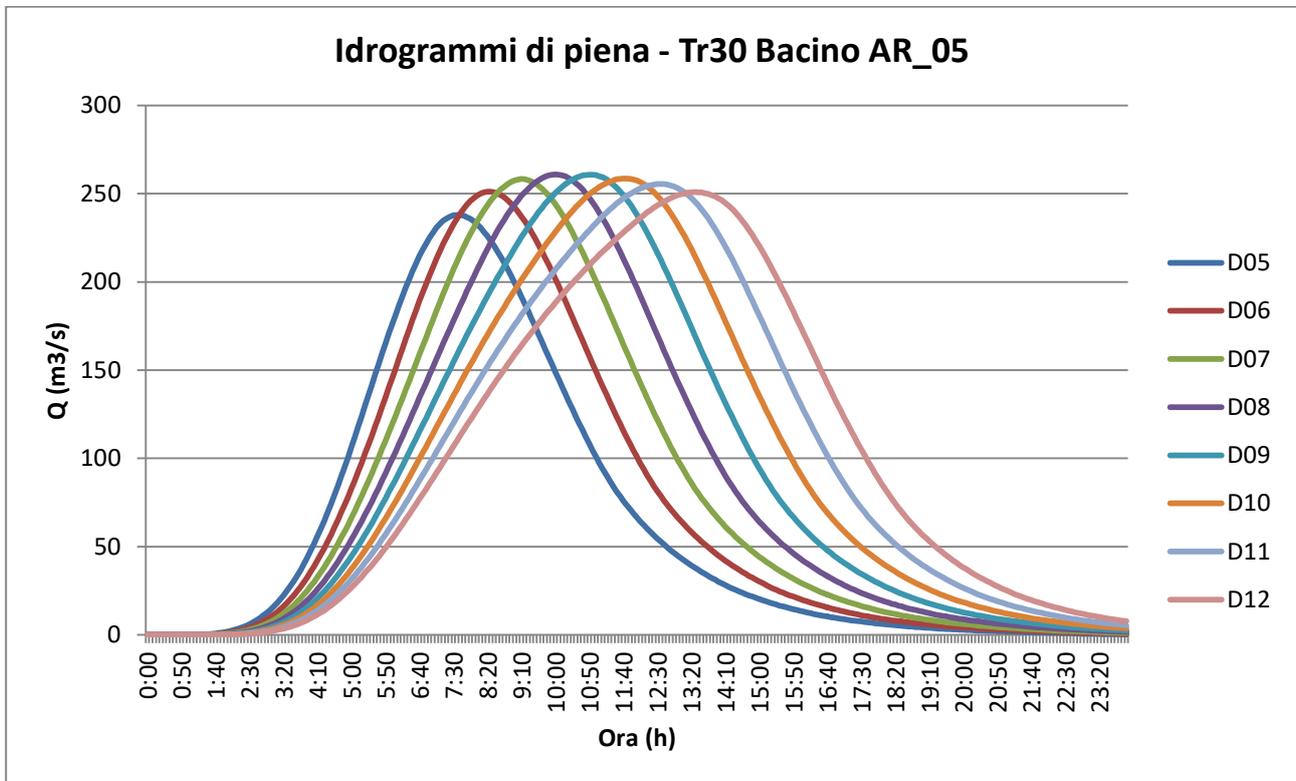


Figura 4.14 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, bacino AR\_05 indagato per ogni durata di pioggia

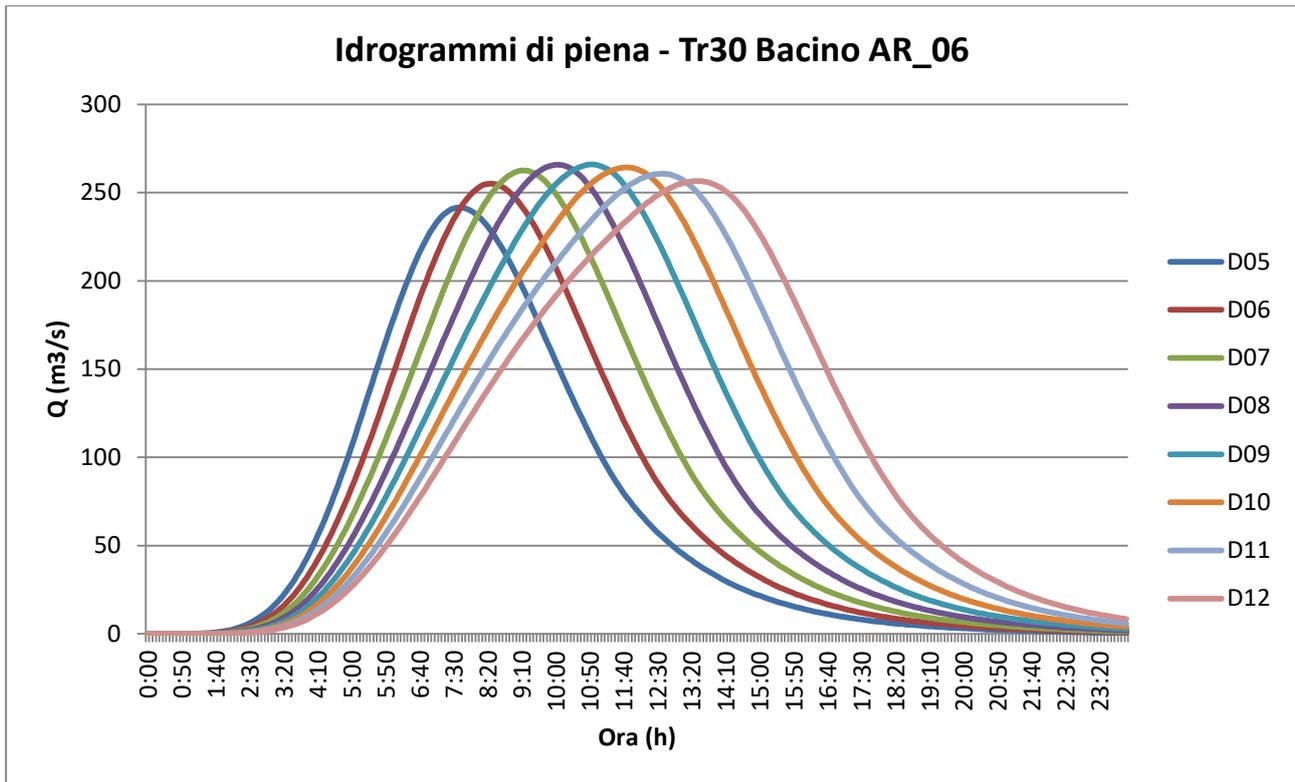


Figura 4.15 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, bacino AR\_06 indagato per ogni durata di pioggia

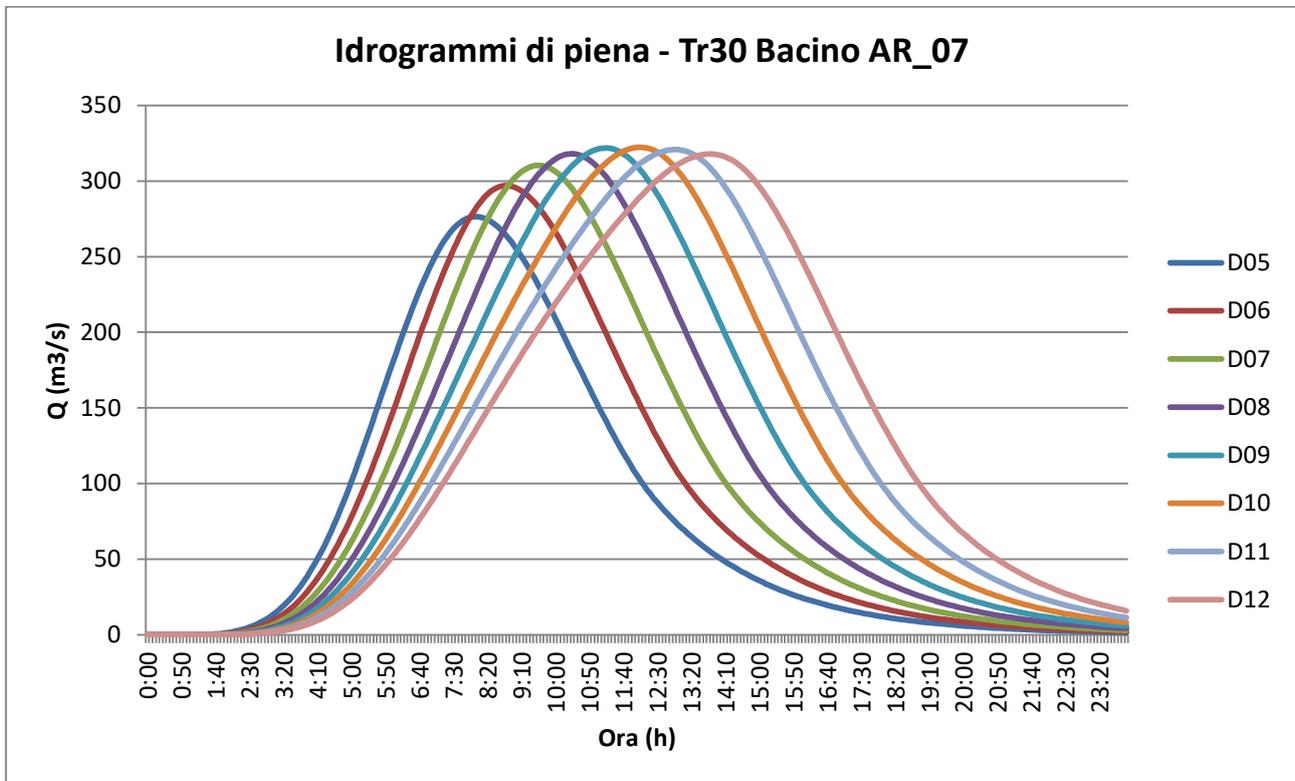


Figura 4.16 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, bacino AR\_07 indagato per ogni durata di pioggia

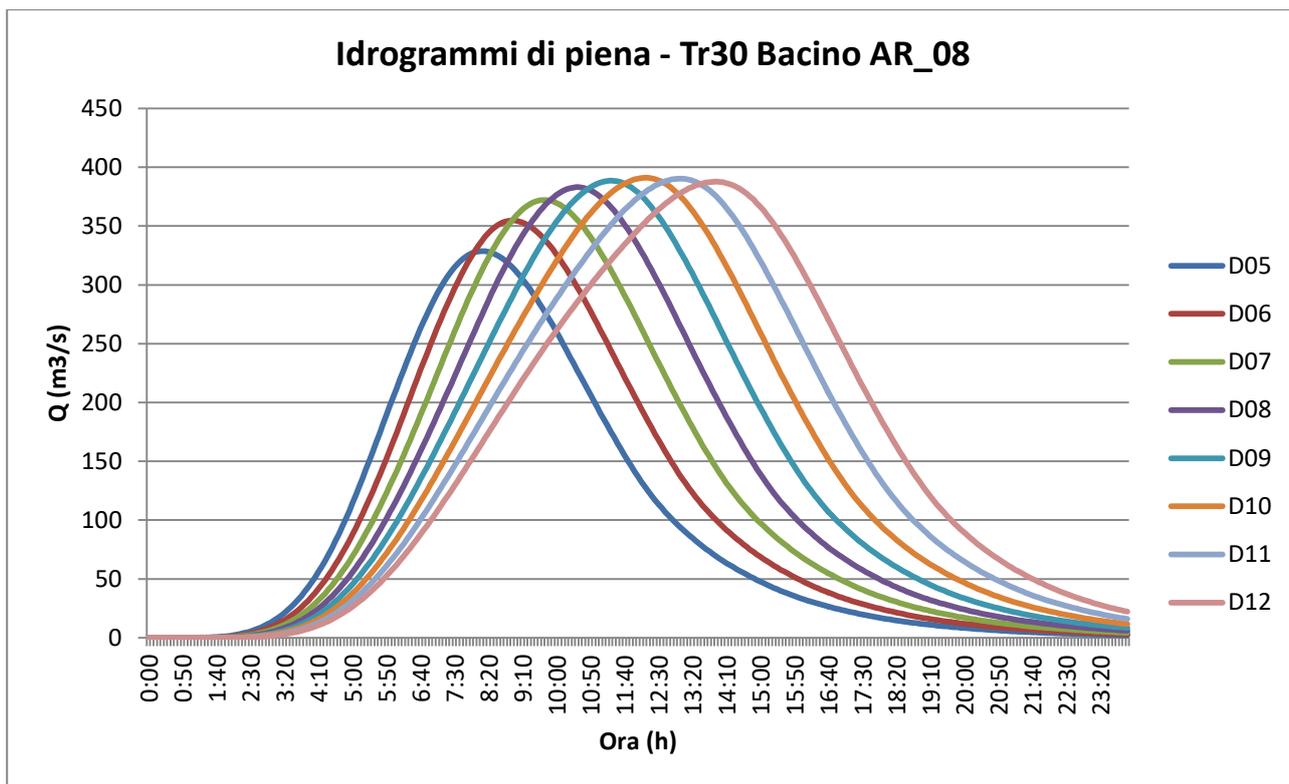


Figura 4.17 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, bacino AR\_08 indagato per ogni durata di pioggia

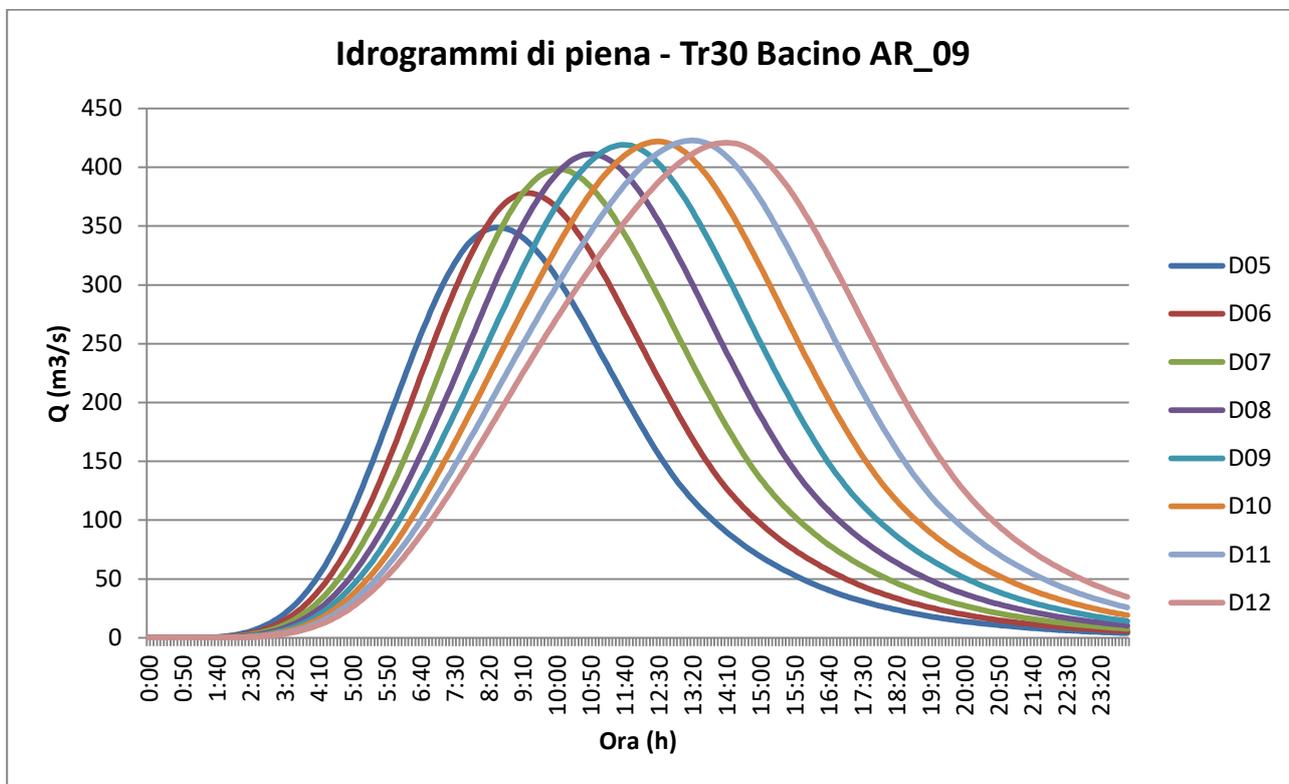


Figura 4.18 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, bacino AR\_09 indagato per ogni durata di pioggia

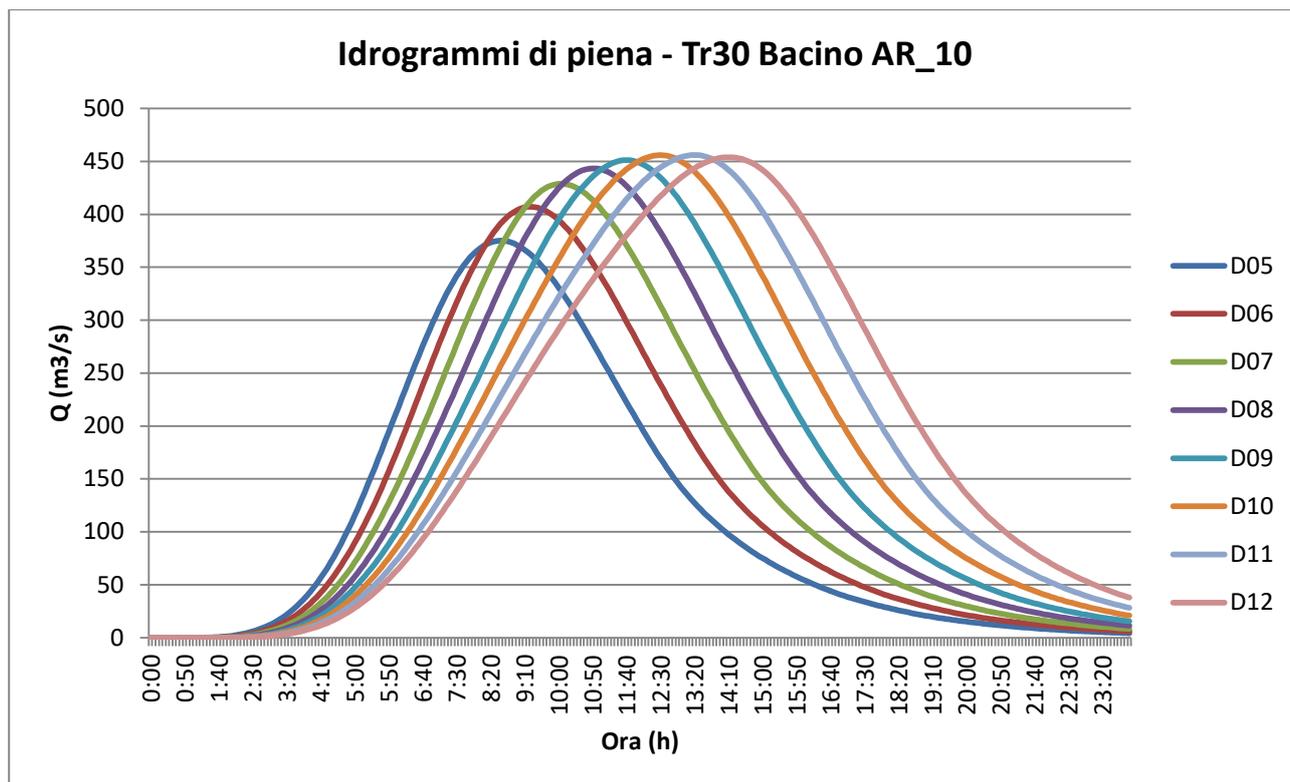


Figura 4.19 – idrogrammi di piena per Tr30 anni, bacino AR\_10 indagato per ogni durata di pioggia

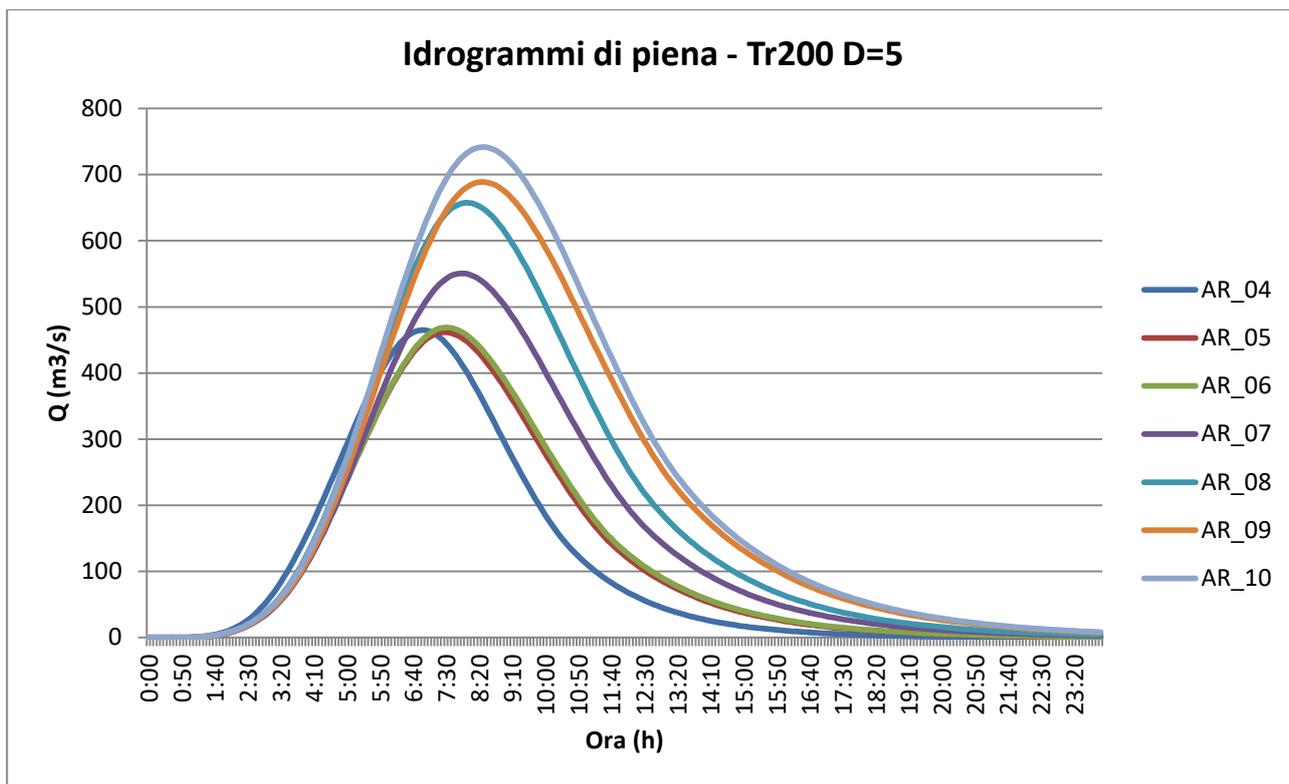


Figura 4.20 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, durata di pioggia 5 ore riferiti ad ogni bacino indagato

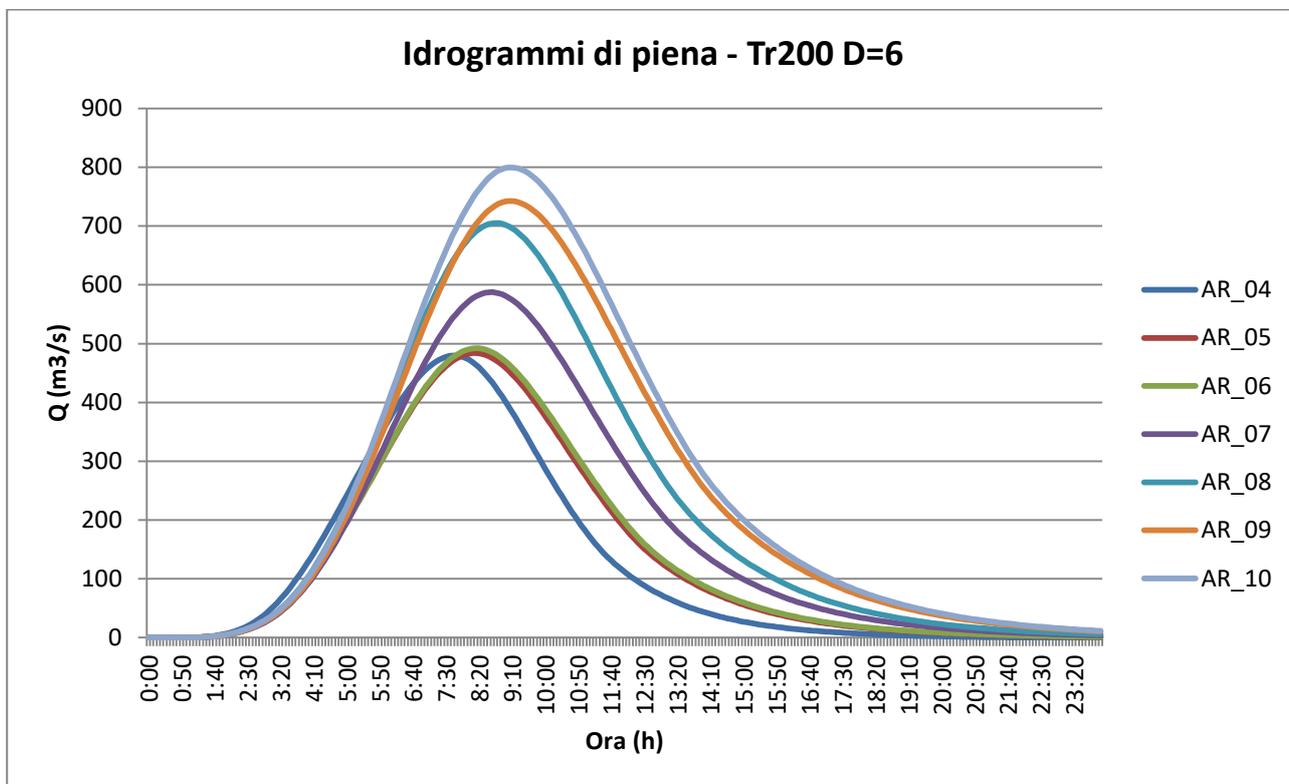


Figura 4.21 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, durata di pioggia 6 ore riferiti ad ogni bacino indagato

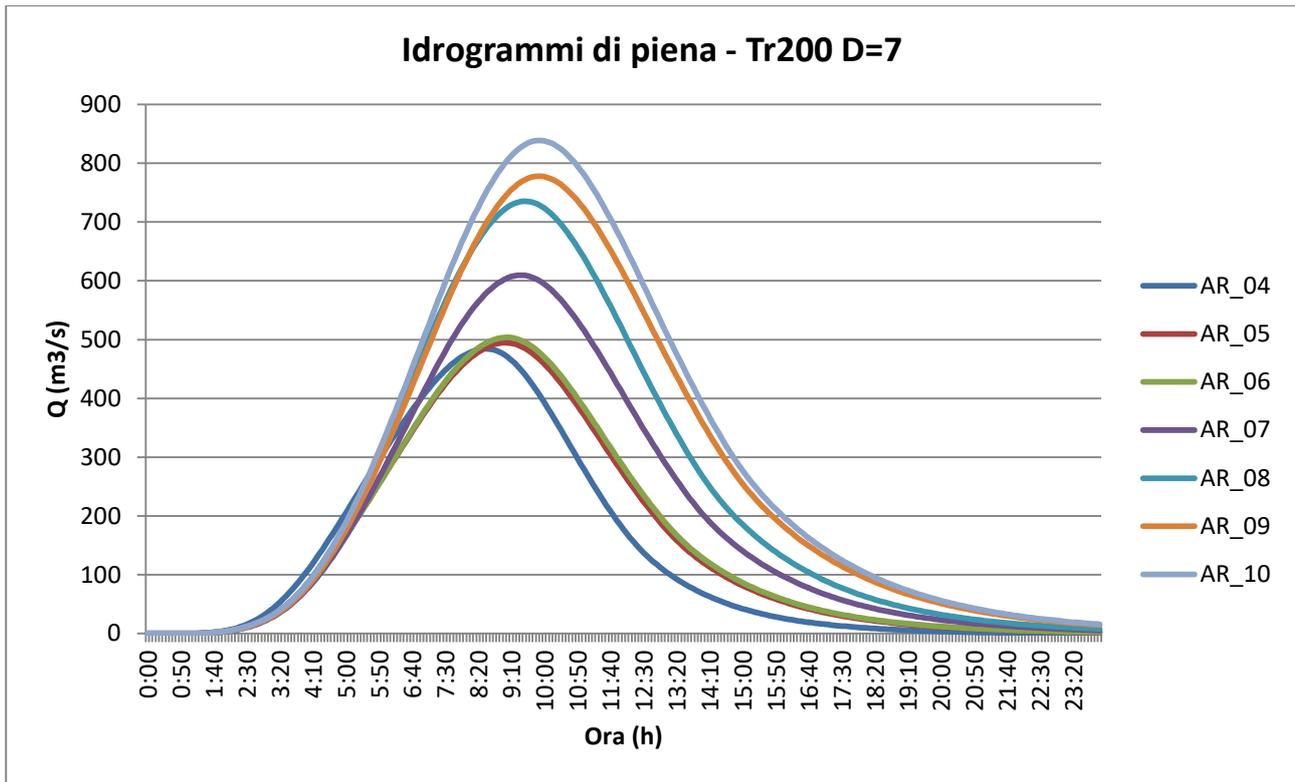


Figura 4.22 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, durata di pioggia 7 ore riferiti ad ogni bacino indagato

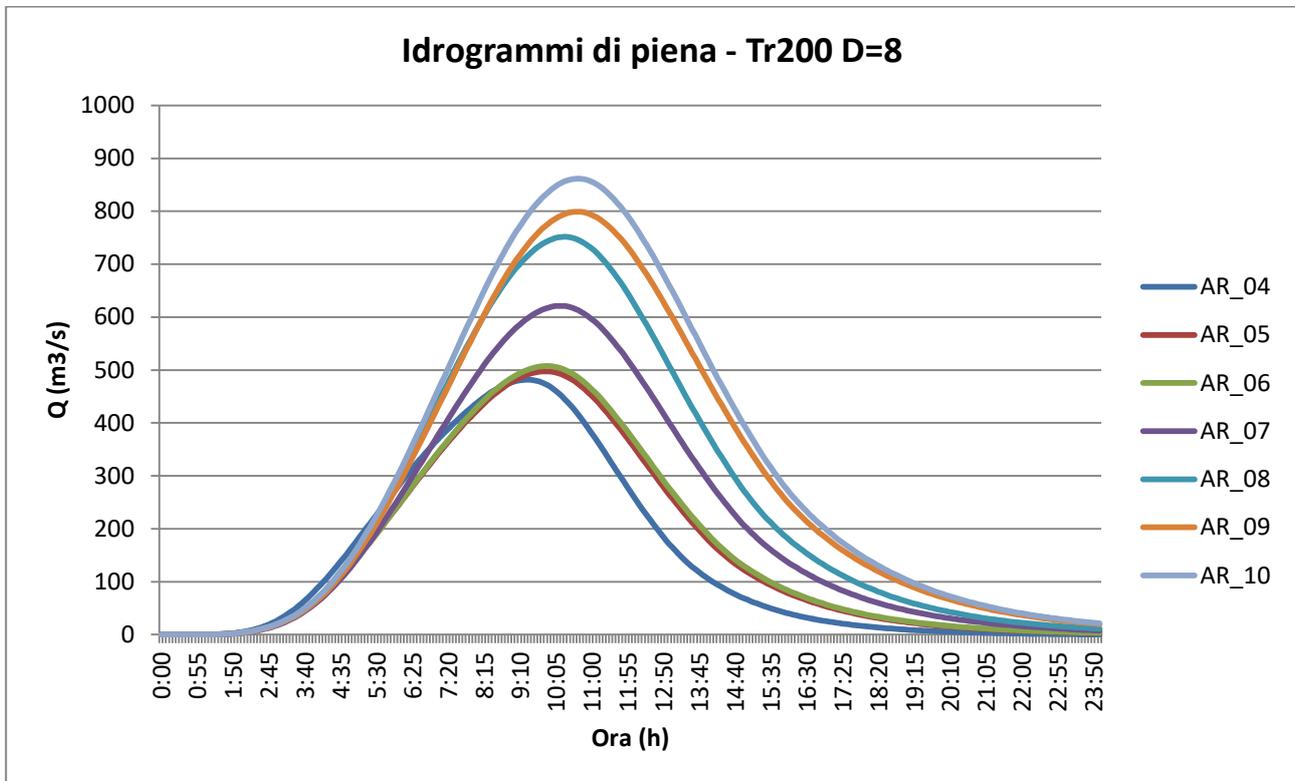


Figura 4.23 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, durata di pioggia 8 ore riferiti ad ogni bacino indagato

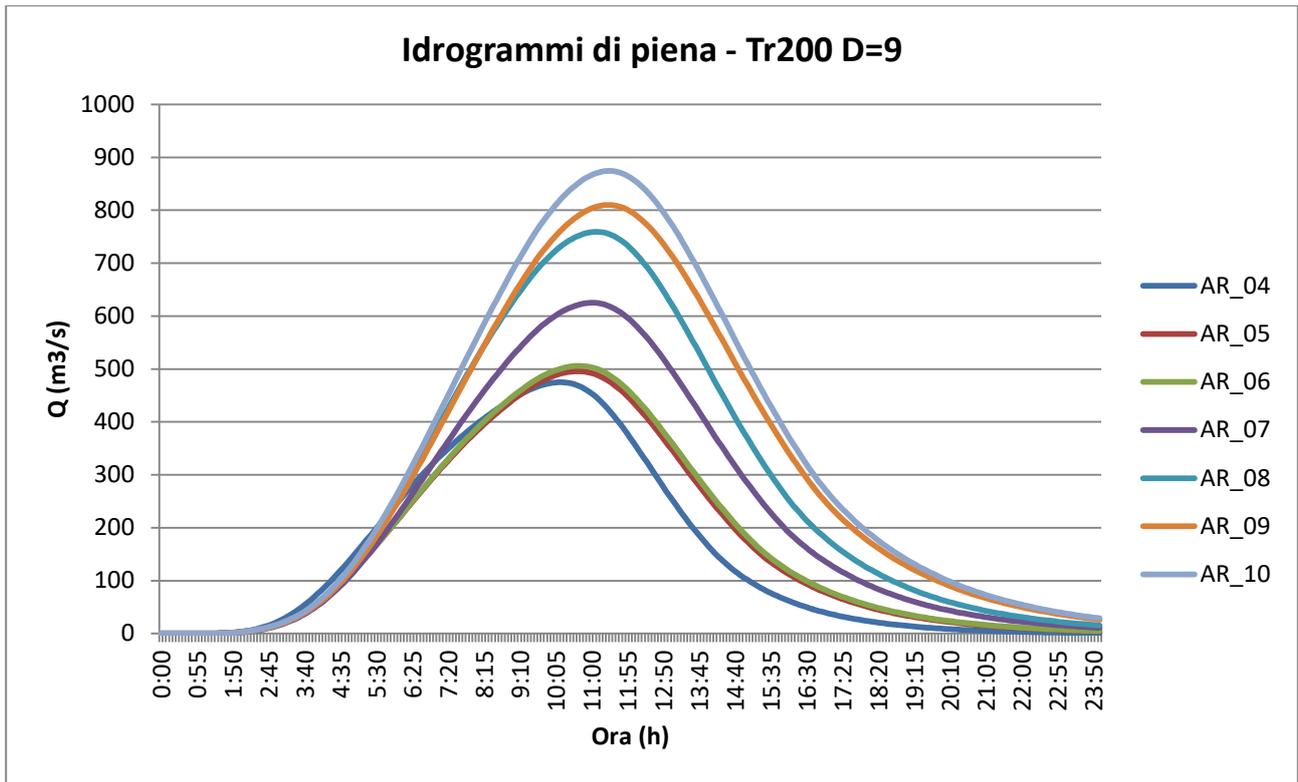


Figura 4.24 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, durata di pioggia 9 ore riferiti ad ogni bacino indagato

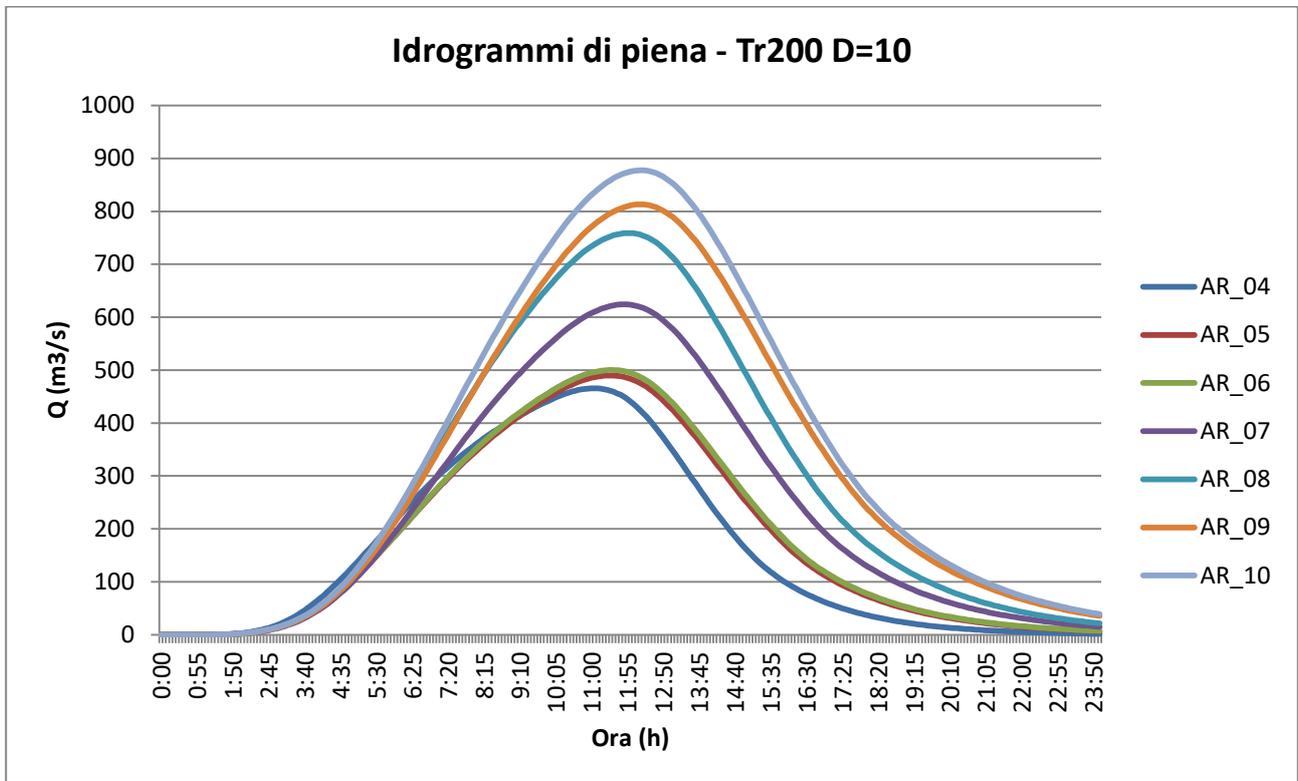


Figura 4.25 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, durata di pioggia 10 ore riferiti ad ogni bacino indagato

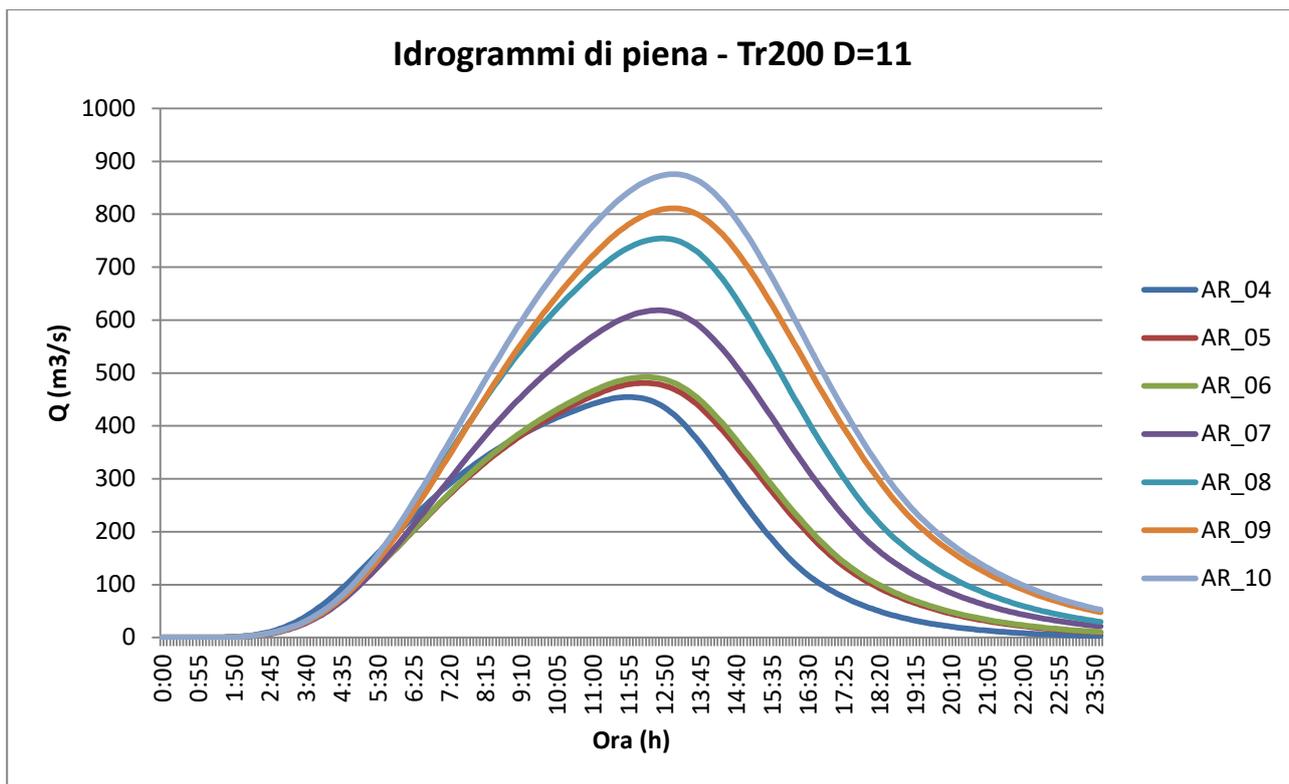


Figura 4.26 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, durata di pioggia 11 ore riferiti ad ogni bacino indagato

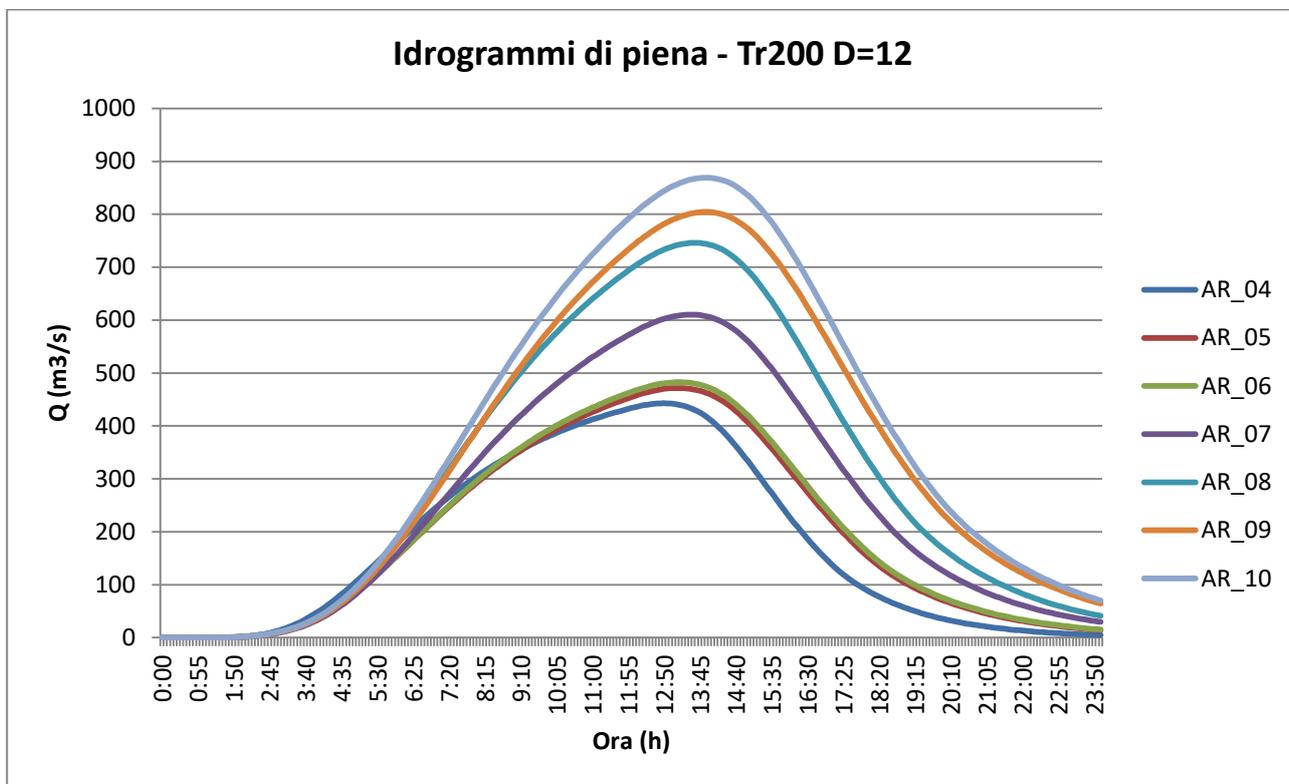


Figura 4.27 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, durata di pioggia 11 ore riferiti ad ogni bacino indagato

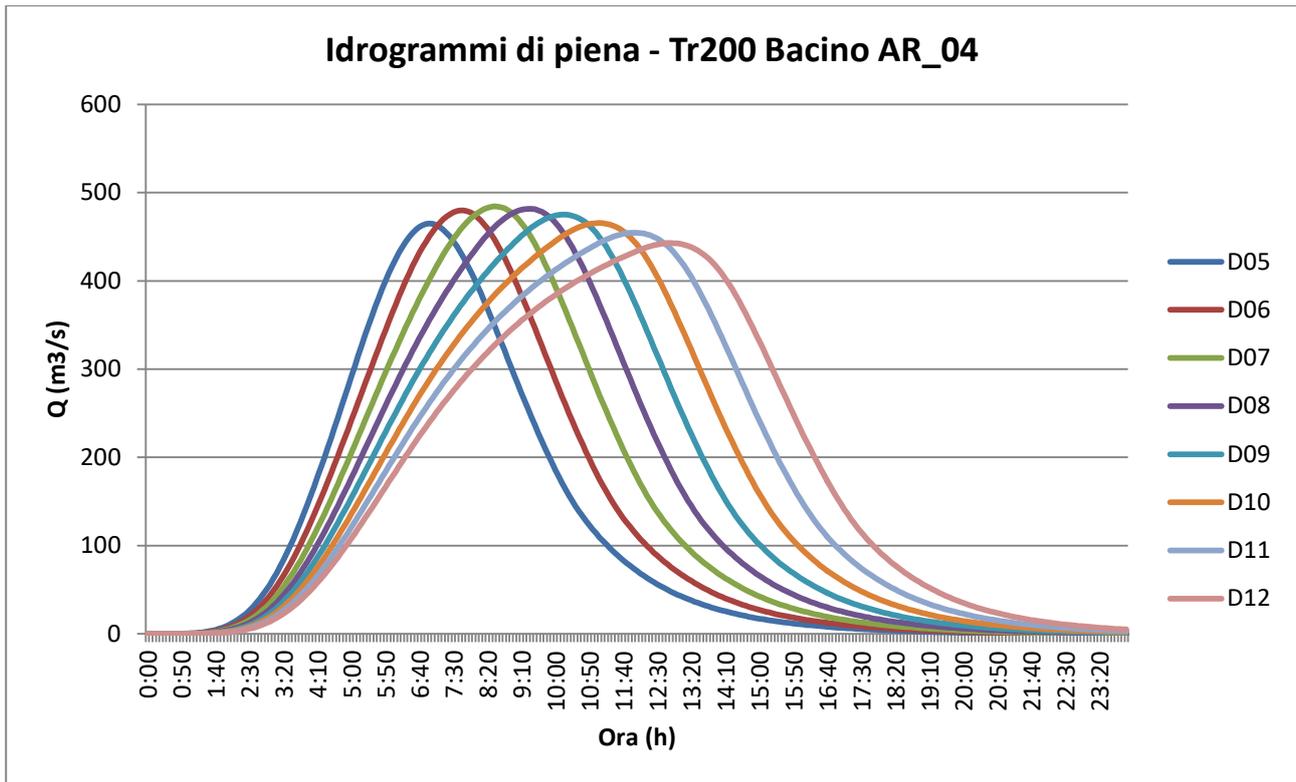


Figura 4.28 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, bacino AR\_04 indagato per ogni durata di pioggia

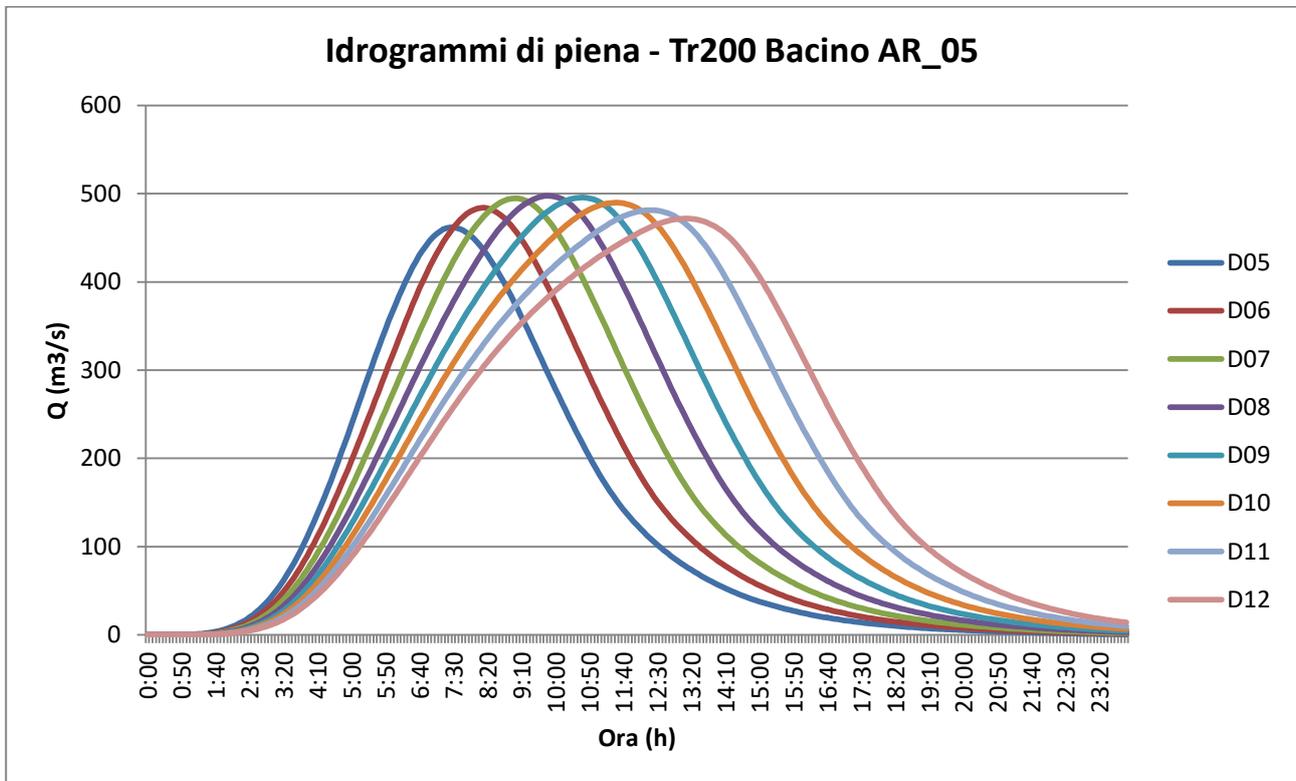


Figura 4.29 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, bacino AR\_05 indagato per ogni durata di pioggia

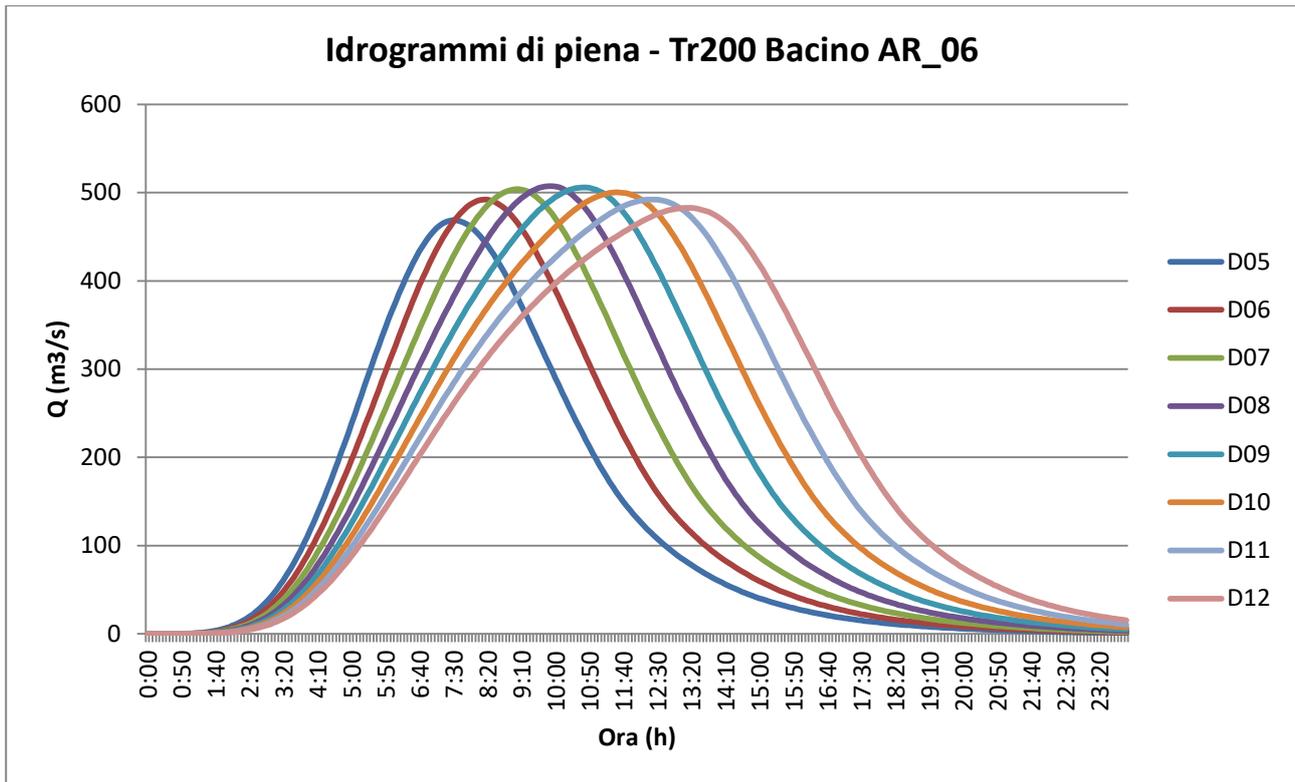


Figura 4.30 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, bacino AR\_06 indagato per ogni durata di pioggia

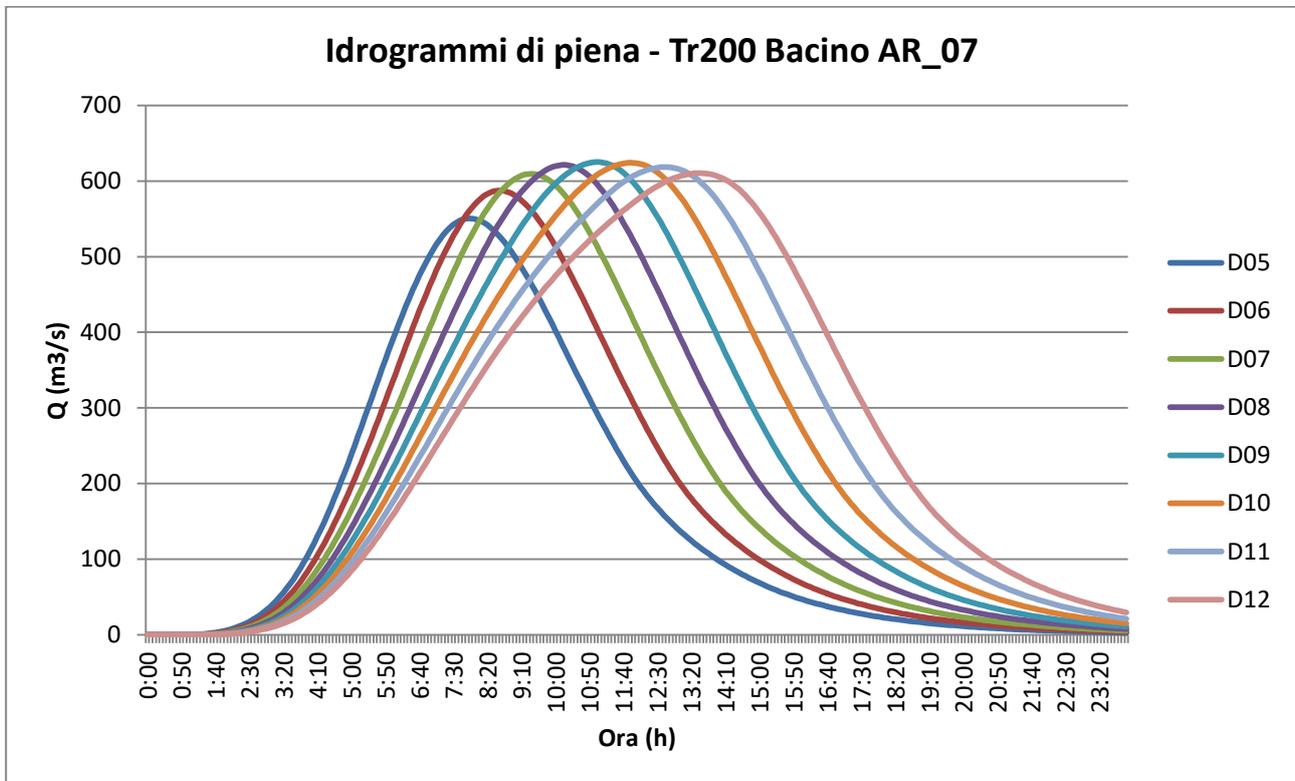


Figura 4.31 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, bacino AR\_07 indagato per ogni durata di pioggia

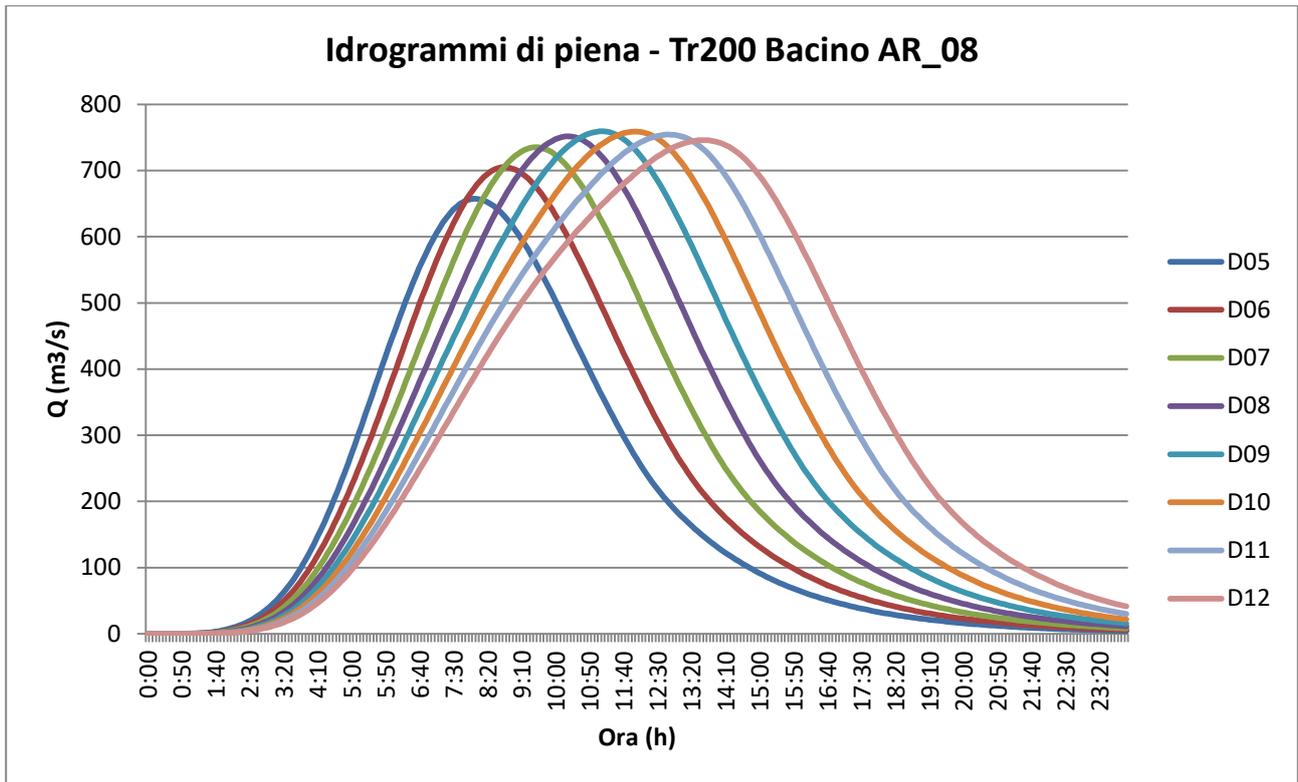


Figura 4.32 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, bacino AR\_o8 indagato per ogni durata di pioggia

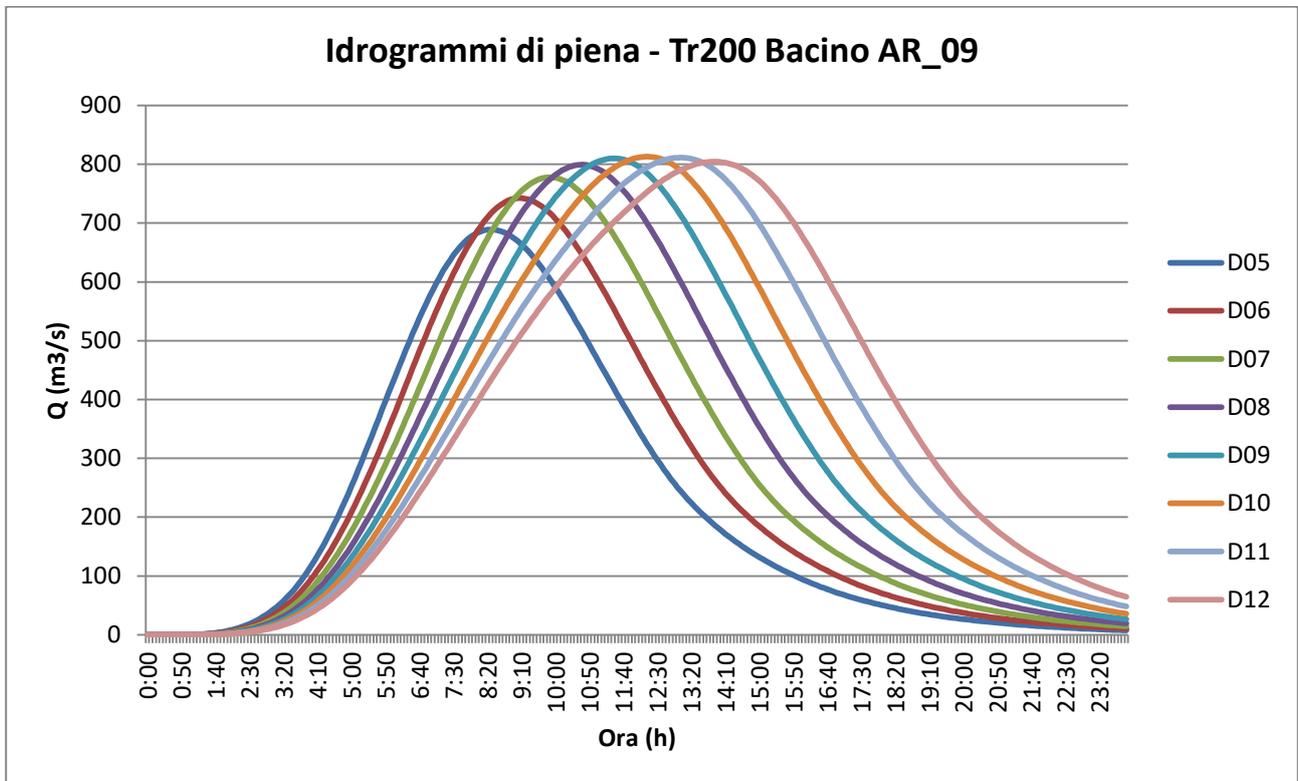
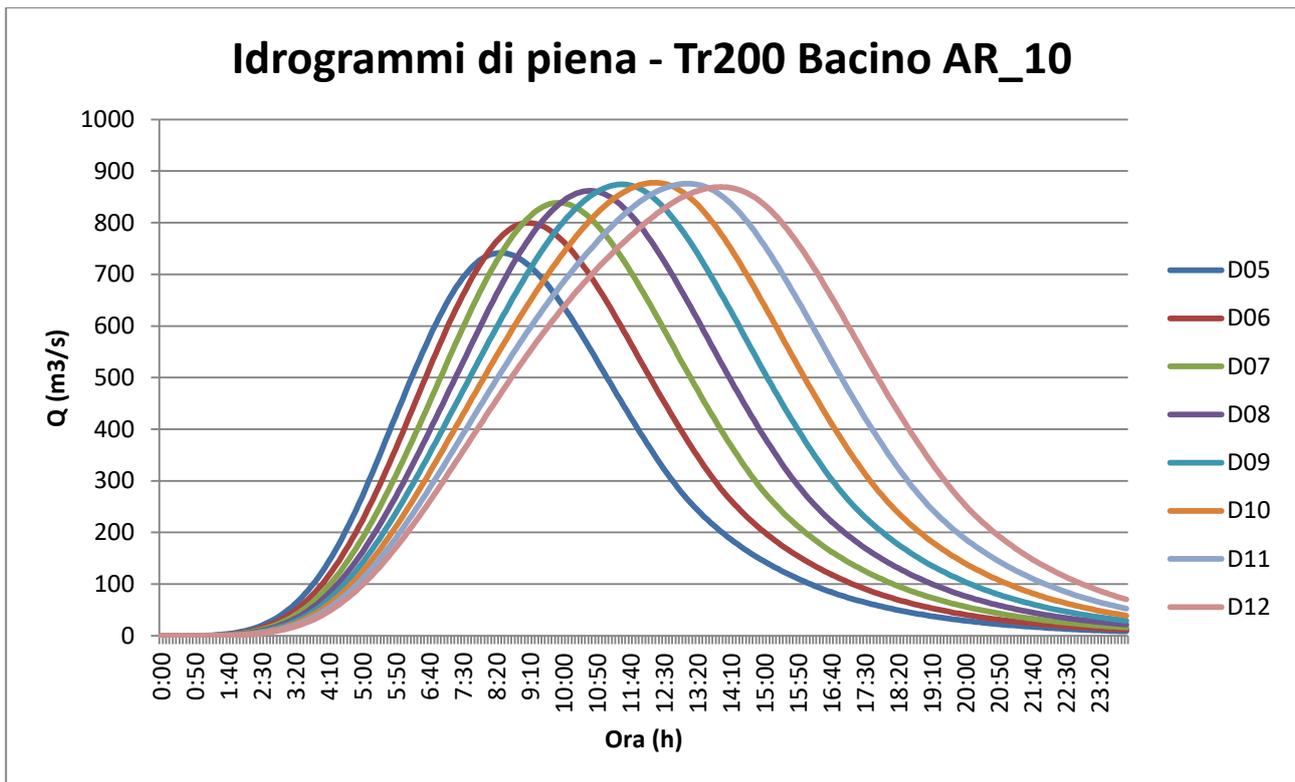


Figura 4.33 – idrogrammi di piena per Tr200 anni, bacino AR\_o9 indagato per ogni durata di pioggia



**Figura 4.34** – idrogrammi di piena per Tr200 anni, bacino AR\_10 indagato per ogni durata di pioggia

#### 4.3.4 Confronto del modello idrologico con un caso reale

Il modello idrologico fin qui descritto è stato verificato utilizzando i valori di precipitazione misurati in due distinti eventi meteorici avvenuti il 5/6 novembre e 15/16/17 novembre 2019.

I dati pluviometrici registrati sono stati ricavati dalle immagini disponibili dai pluviometri della rete di monitoraggio del CFR Regione Toscana, confrontando poi l'idrogramma di piena del modello idrologico con i valori idrometrici registrati presso l'idrometro di Pianella, sempre ricavati manualmente dal sito del CFR Regione Toscana.

I pluviometri presi in considerazione sono:

- Castellina in chianti TOS03001286 • 748207 • 1286;
- Castelnuovo Berardenga TOS11000019 • 750307 • 19;
- Gaiole in Chianti TOS11000087 • 750657 • 87;
- Madonna a Brolio TOS03002643 • 744457 • 2643;
- Radda in Chianti TOS01001284 • 744357 • 1284;

- Vagliagli TOS03002640 • 747807 • 2640.

L'idrometro preso in considerazione è:

- Arbia a Pianella TOS03005651 • 751959 • 5651.

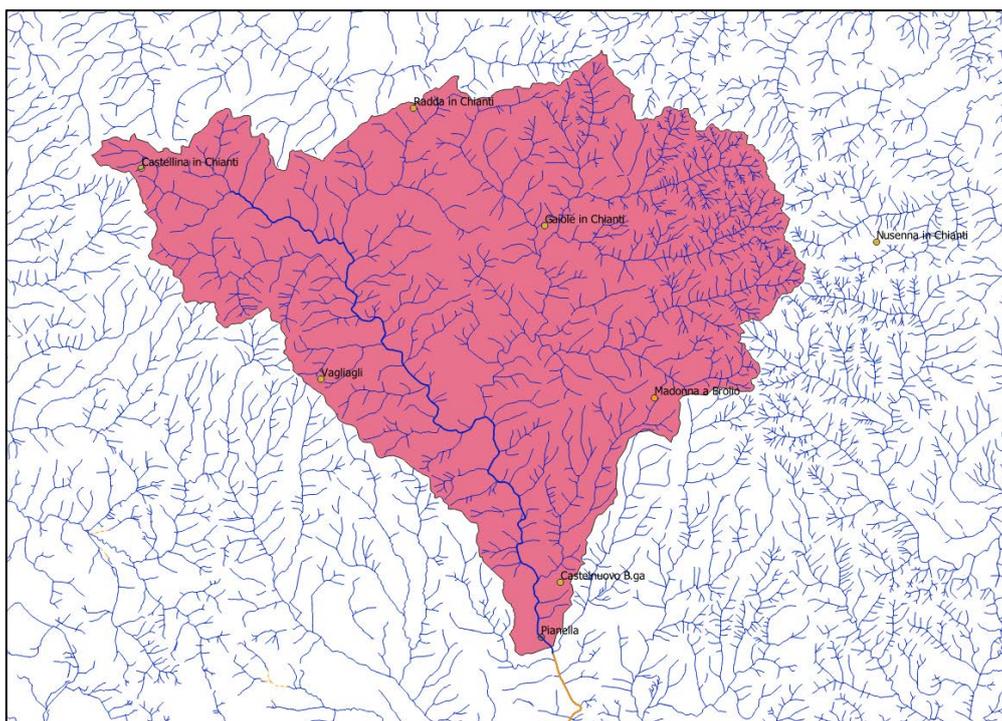
L'idrometro di Pianella è situato a monte della confluenza con il T. Bornia, per cui risulta corretto applicare il modello idrologico del bacino AR03, realizzato tramite il procedimento fin qui esposto e riassunto come segue:

| Codice | Bacino idrografico    | Area [km <sup>2</sup> ] | CNIII | Lag [min] |
|--------|-----------------------|-------------------------|-------|-----------|
| AR03   | A valle del T. Pecine | 147.6                   | 84    | 168       |

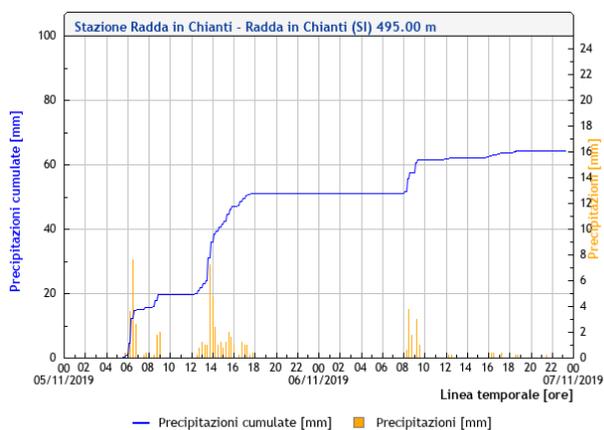
Tabella 4.10 – dati idrologici del bacino AR03

L'idrometro di Pianella non presenta scala di deflusso e zero idrometrico, per cui il confronto di seguito sarà utile per considerare i tempi di passaggio dell'evento di piena.

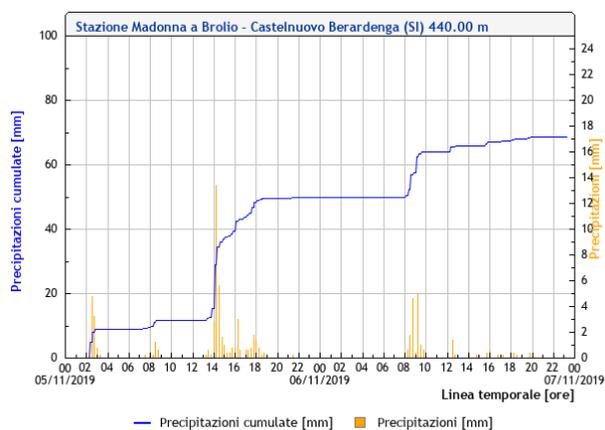
Dato che il procedimento per il calcolo dei parametri idrologici è il medesimo per tutti i bacini, l'eventuale corrispondenza dei tempi di passaggio dell'onda di piena tra l'evento reale e l'evento da modello idrologico del bacino AR03 sarà estesa positivamente a tutti i bacini del T. Arbia analizzati nel presente studio.



**Figura 4.35** – Posizione dei pluviometri e dell'idrometro presi in considerazione all'interno del bacino AR\_03 del T. Arbia (in blu) e T. Arbia modellato idraulicamente (in arancio)



Servizio Idrologico Regione Toscana <http://www.sir.toscana.it>



Servizio Idrologico Regione Toscana <http://www.sir.toscana.it>

**Figura 4.36 e Figura 4.37** - misure pluviometriche evento 5/6-11-2019, stazioni di Radda in Chianti e Madonna a Brolio

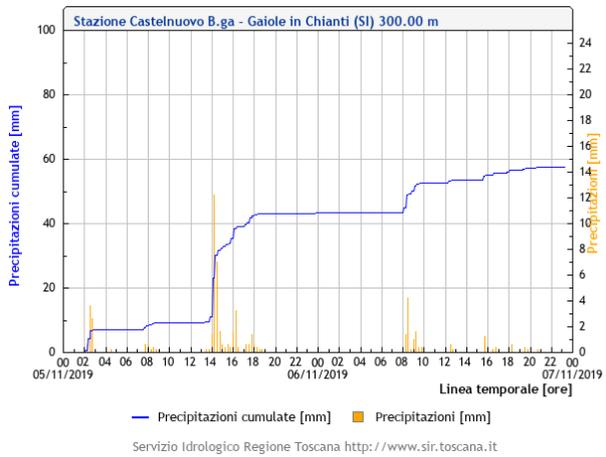
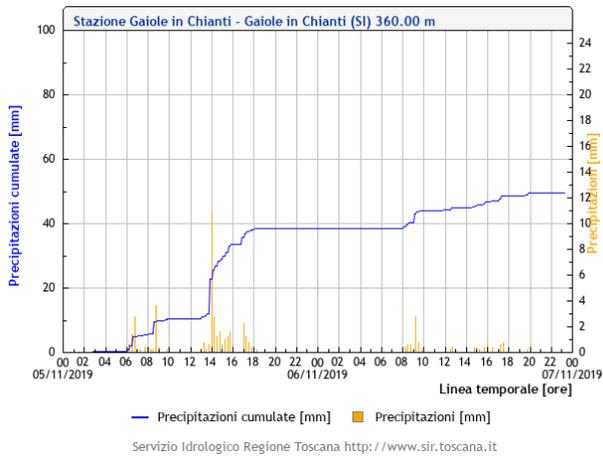


Figura 4.38 e Figura 4.39 – misure pluviometriche evento 5/6-11-2019, stazioni di Gaiole in Chianti e Castelnovo Berardenga

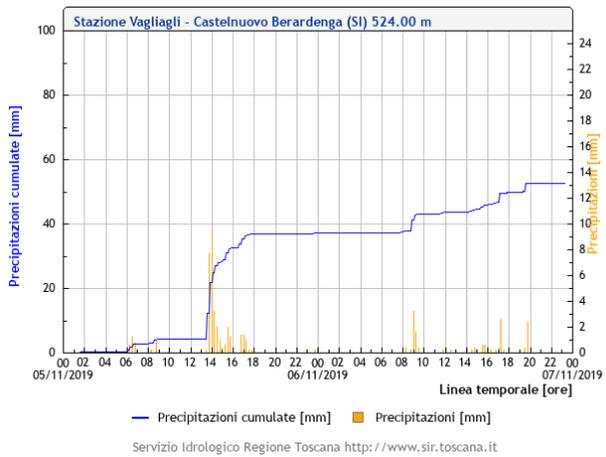
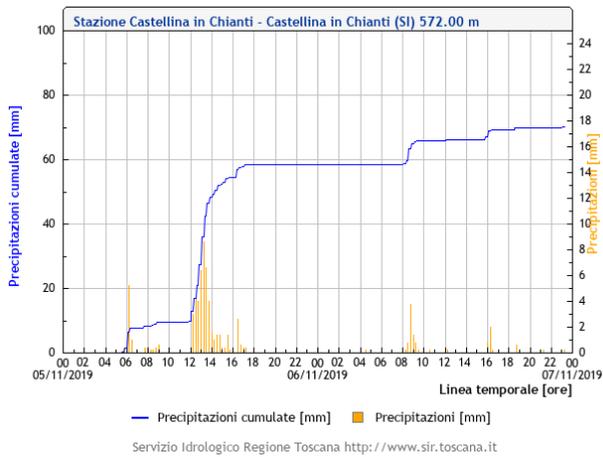


Figura 4.40 e Figura 4.41 – misure pluviometriche evento 5/6-11-2019, stazioni di Castellina in Chianti e Vagliagli

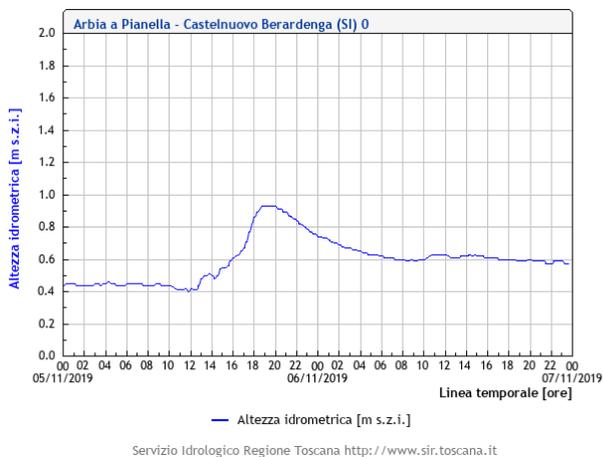


Figura 4.42 – misure idrometriche evento 5/6-11-2019, stazione di Pianella

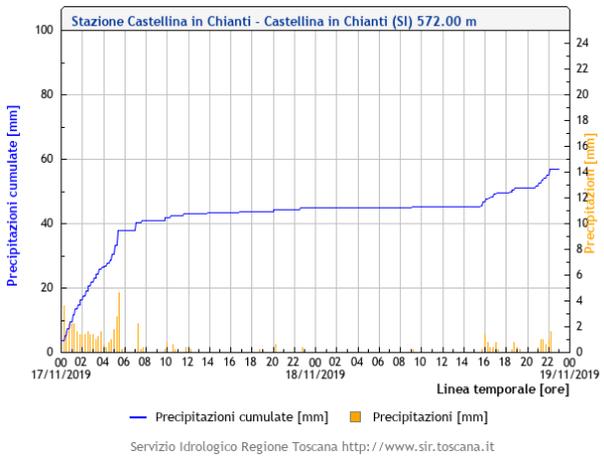
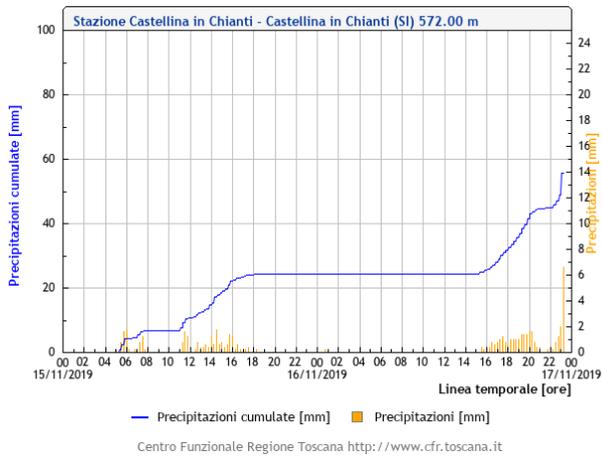


Figura 4.43 e Figura 4.44 – misure pluviometriche evento 15/16/17-11-2019, stazione di Castellina in Chianti

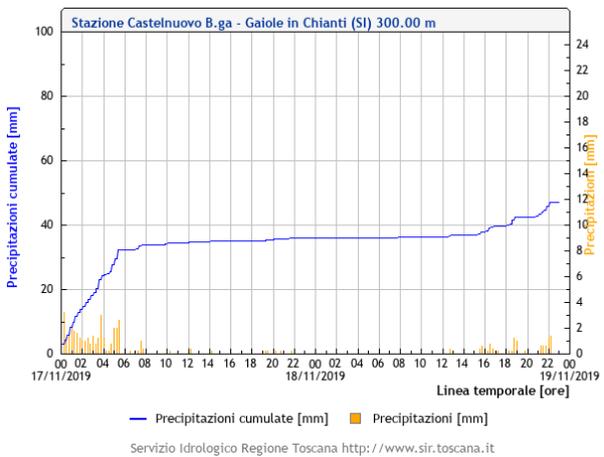
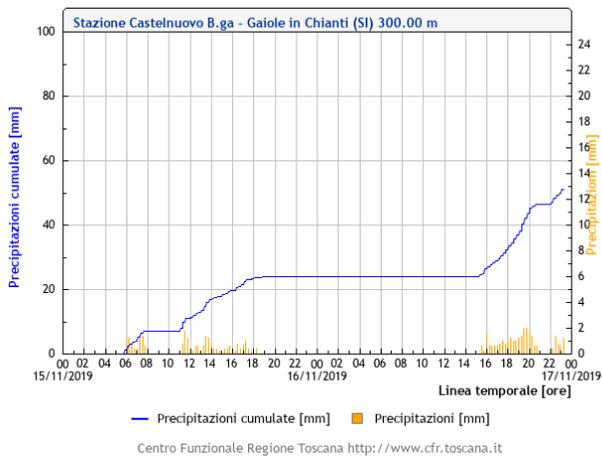


Figura 4.45 e Figura 4.46 – misure pluviometriche evento 15/16/17-11-2019, stazione di Castelnuovo Berardenga

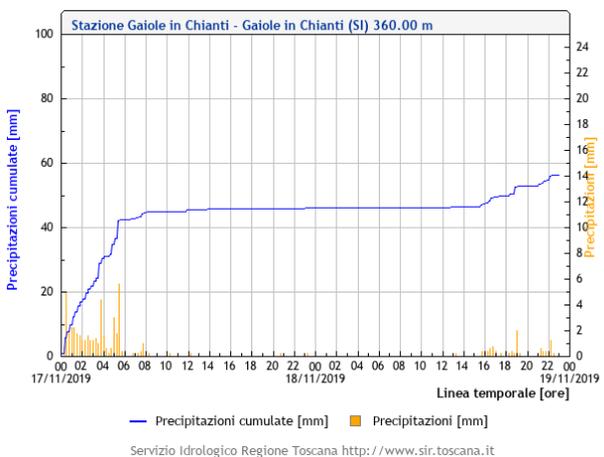
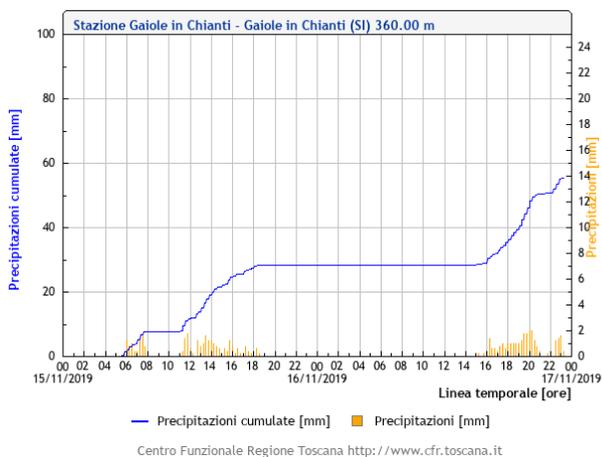


Figura 4.47 e Figura 4.48 – misure pluviometriche evento 15/16/17-11-2019, stazione di Gaiole in Chianti

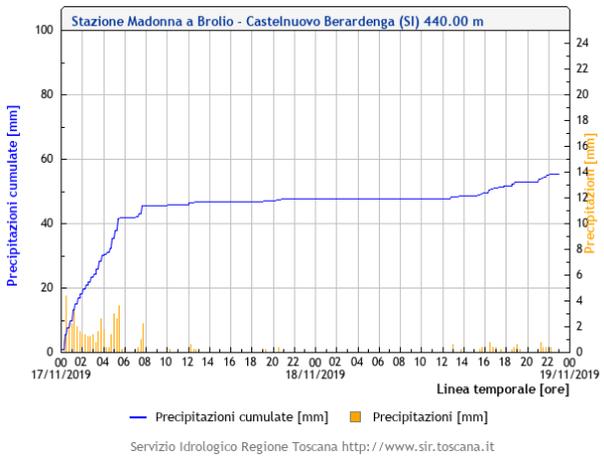
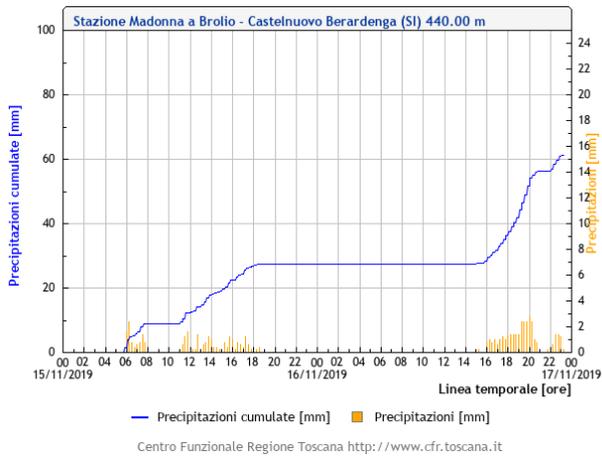


Figura 4.49 e Figura 4.50 – misure pluviometriche evento 15/16/17-11-2019, stazione di Madonna a Brolio

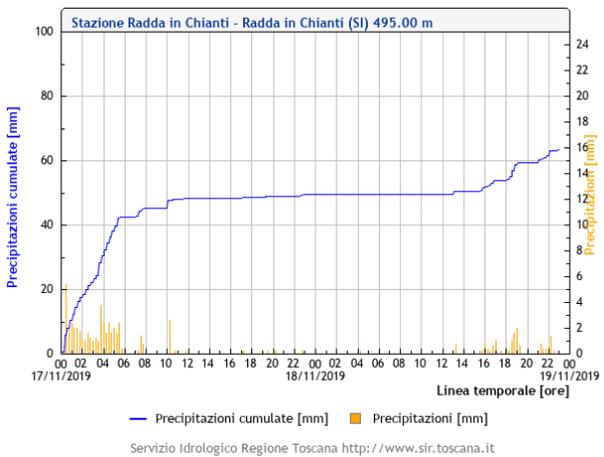
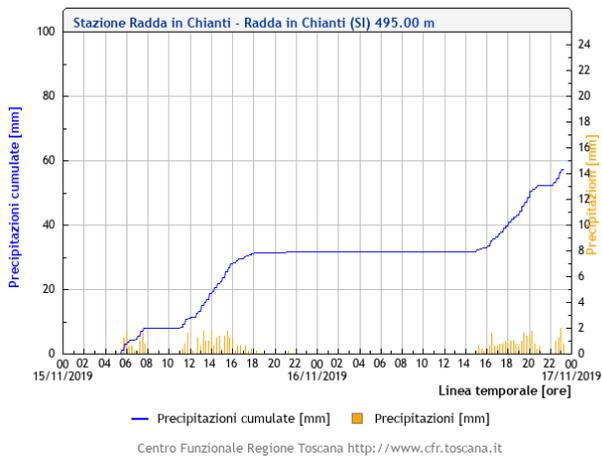


Figura 4.51 e Figura 4.52 – misure pluviometriche evento 15/16/17-11-2019, stazione di Radda in Chianti

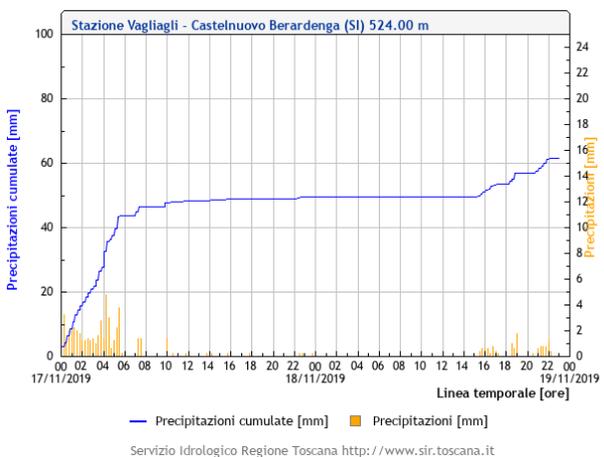
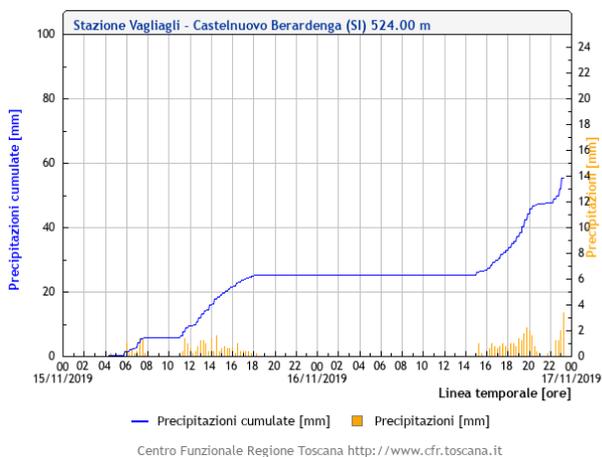


Figura 4.53 e Figura 4.54 – misure pluviometriche evento 15/16/17-11-2019, stazione di Vagliagli

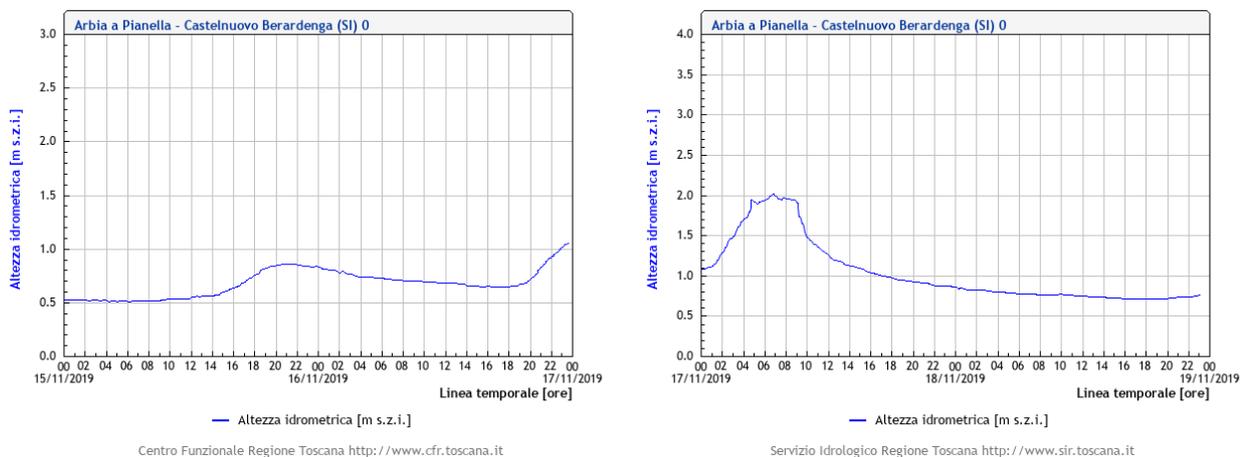


Figura 4.55 e Figura 4.56 – misure idrometriche evento 15/16/17-11-2019, stazione di Pianella

Di seguito i risultati del confronto, da cui emerge la corrispondenza dei tempi di picco degli eventi di piena.

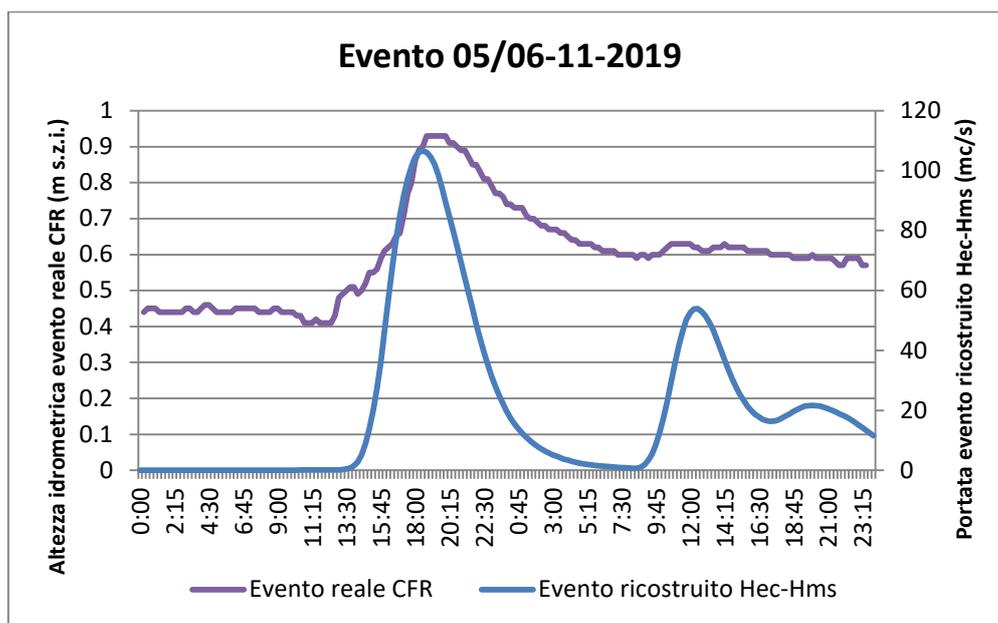
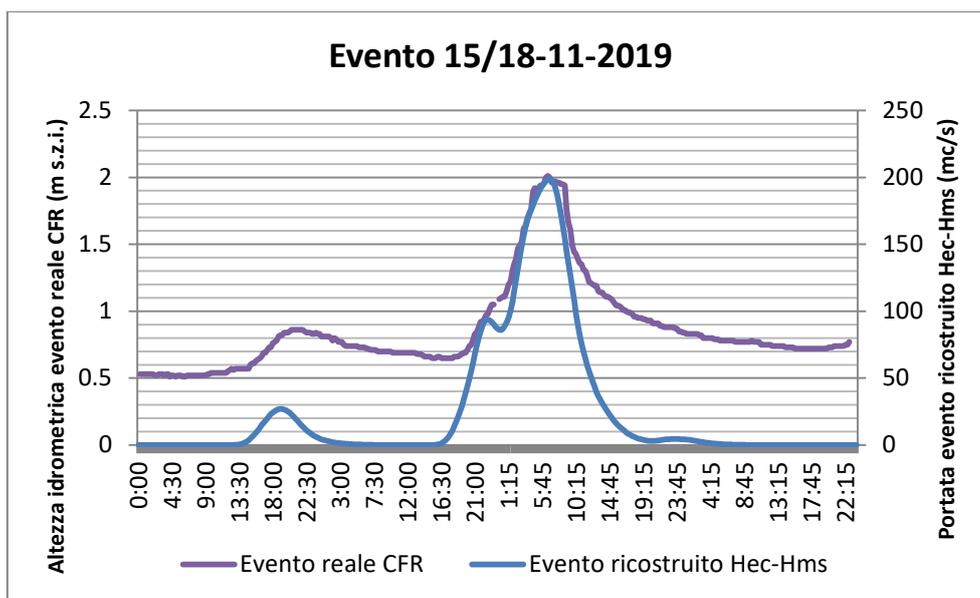


Figura 4.57 – Confronto tra dato idrometrico misurato all'idrometro di Pianella e l'idrogramma di piena ricostruito tramite modello idrologico per l'evento del 5/6-11-2019



**Figura 4.58** – Confronto tra dato idrometrico misurato all'idrometro di Pianella e l'idrogramma di piena ricostruito tramite modello idrologico per l'evento del 15/16/17-11-2019

#### 4.3.5 Confronto idrologico con precedente studio sul T. Arbia

Le conoscenze idrologico idrauliche del F. Arbia si riferiscono ai documenti del 2006 relativi a "Analisi della pericolosità idraulica del T. Arbia dalla confluenza del T. Massellone a Buonconvento e del F. Ombrone nell'intorno della confluenza con il T. Arbia" redatto dallo studio "iIDeA - ingegneria Idraulica e Ambientale di A. Bastianacci, L. Castellani e A. Sorbi" su incarico dell'Amministrazione Provinciale di Siena – Servizio LL.PP. e Difesa del Suolo, anno 2006.

Questo documento rappresenta il più recente ed esaustivo quadro conoscitivo del F. Arbia ed è corredato dai dati di modellazione idrologica (effettuata tramite modello afflussi-deflussi con software ALTo 2004) e idraulica (effettuata con software Hec-Ras); per la conoscenza approfondita si rimanda alla Relazione Idrologica (Documento Do2) e agli elaborati a corredo.

rimanda alla Relazione Idrologica (Documento Do2) e agli elaborati a corredo.

Ai fini del confronto qualitativo, si sono ricavati i principali parametri e caratteristiche per impostare un modello idrologico che sia confrontabile con quello riportato nel seguito. Dalla Relazione Idrologica (Documento Do2) si è estratto:

- Gli idrogrammi di piena del F. Arbia sono stati calcolati a valle delle principali affluenti, quantificati considerando l'intero bacino a monte della sezione di chiusura.

- LSPP in forma trinomia;
- AlTo aggiornato al 2006 (aggiornamento dei parametri  $n$ ,  $k$ ,  $i_a$ ,  $k_s$ ).

Di conseguenza si estraggono i principali dati utili al confronto (codice asta AlTo, durata critica, portata massima di piena per tempi di ritorno di 30 e 200 anni, parametri  $a$ ,  $n$ ,  $m$  della forma trinomia della LSPP per durate di pioggia > 1 ora e altezza d'acqua per evento di pioggia di 5 ore senza riduzione areale).

| Descrizione              | F_Id (AlTo) | Area [km <sup>2</sup> ] | Q <sub>max,Tr30</sub> [m <sup>3</sup> /s] | Q <sub>max.Tt200</sub> [m <sup>3</sup> /s] | a      | n     | m     |
|--------------------------|-------------|-------------------------|---|--|--------|-------|-------|
| A valle del T. Bornia    | 2562        | 154.24                  | 244                                       | 432  | 25.036 | 0.276 | 0.199 |
| A valle del T. Querciola | 4856        | 173.12                  | 278                                       | 487  | 24.997 | 0.279 | 0.201 |
| A valle del F.so Rigo    | 4981        | 175.92                  | 281                                       | 492  | 24.994 | 0.279 | 0.201 |
| A valle del T. Malena    | 5761        | 240.16                  | 357                                       | 612  | 25.316 | 0.274 | 0.199 |
| A valle del T. Bozzone   | 5883        | 297.36                  | 432                                       | 742  | 25.112 | 0.279 | 0.203 |
| A valle del T. Riluogo   | 6666        | 321.44                  | 452                                       | 773  | 25.094 | 0.281 | 0.204 |
| A valle del T. Tressa    | 6682        | 345.52                  | 466                                       | 796  | 25.047 | 0.283 | 0.205 |

**Tabella 4.11** – dati idrologici desunti da “Analisi della pericolosità idraulica del T. Arbia dalla confluenza del T. Massellone a Buonconvento e del F. Ombrone nell’intorno della confluenza con il T. Arbia” redatto dallo studio “iLDeA – ingegneria Idraulica e Ambientale di A. Bastianacci, L. Castellani e A. Sorbi” su incarico dell’Amministrazione Provinciale di Siena – Servizio LL.PP. e Difesa del Suolo, anno 2006.

Il primo confronto si basa sulla differenza tra altezza di pioggia riferite ad un evento di 5 ore, per la sezione di chiusura in modo da comprendere l’intero bacino del F. Arbia studiato, inoltre è escluso il coefficiente di ragguglio all’area; di seguito sono mostrati i risultati.

| Codice 2006 | Codice 2018 | Bacino idrografico    | H Tr <sub>30</sub> 2006 [mm] | H Tr <sub>30</sub> 2020 [mm] | Diff [%] | H Tr <sub>200</sub> 2006 [mm] | H Tr <sub>200</sub> 2020 [mm] | Diff [%] |
|-------------|-------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|----------|-------------------------------|-------------------------------|----------|
| 6682        | AR10        | A valle del T. Tressa | 78.9                         | 84.1                         | +6%      | 116.2                         | 129.3                         | +11%     |

**Tabella 4.12** – differenza tra le altezze di pioggia per evento di pioggia di durata 5 ore

In termini di altezze di pioggia, gli aumenti dovuti all’aggiornamento delle LSPP mostrano un aumento compreso tra il 6% e l’11%, valore di per se atteso e in linea con l’andamento generale per le aree del territorio senese.

All’aumento delle altezze di pioggia consegue una modifica degli idrogrammi di piena, in questo caso confrontati tramite la portata di picco per tempi di ritorno 30 e 200 anni per ogni sezione di chiusura fin qui analizzata.

| Codice 2006 | Codice 2018 | Bacino idrografico       | $Q_{\max, Tr30}$ 2006 [m <sup>3</sup> /s] | $Q_{\max, Tr30}$ 2020 [m <sup>3</sup> /s] | Diff [%] | $Q_{\max, Tt200}$ 2006 [m <sup>3</sup> /s] | $Q_{\max, Tt200}$ 2020 [m <sup>3</sup> /s] | Diff [%] |
|-------------|-------------|--------------------------|---|---|----------|--|--|----------|
| 2562        | AR04        | A valle del T. Bornia    | 244                                       | 252.1                                     | 3%       | 432  | 484.4                                      | 12%      |
| 4856        | AR05        | A valle del T. Querciola | 278                                       | 260.9                                     | -6%      | 487  | 497.6                                      | 2%       |
| 4981        | AR06        | A valle del F.so Rigo    | 281                                       | 265.9                                     | -5%      | 492  | 507.5                                      | 3%       |
| 5761        | AR07        | A valle del T. Malena    | 357                                       | 322.4                                     | -10%     | 612  | 621.3                                      | 2%       |
| 5883        | AR08        | A valle del T. Bozzone   | 432                                       | 391                                       | -9%      | 742  | 751.7                                      | 1%       |
| 6666        | AR09        | A valle del T. Riluogo   | 452                                       | 422.8                                     | -6%      | 773  | 810.1                                      | 5%       |
| 6682        | AR10        | A valle del T. Tressa    | 466                                       | 456                                       | -2%      | 796  | 874.3                                      | 10%      |

Tabella 4.13 - differenza tra le portate di picco

Il confronto tra le portate di picco risente del differente metodo matematico-idrologico adottato con l'utilizzo dei più recenti quadri conoscitivi in materia di uso del suolo.

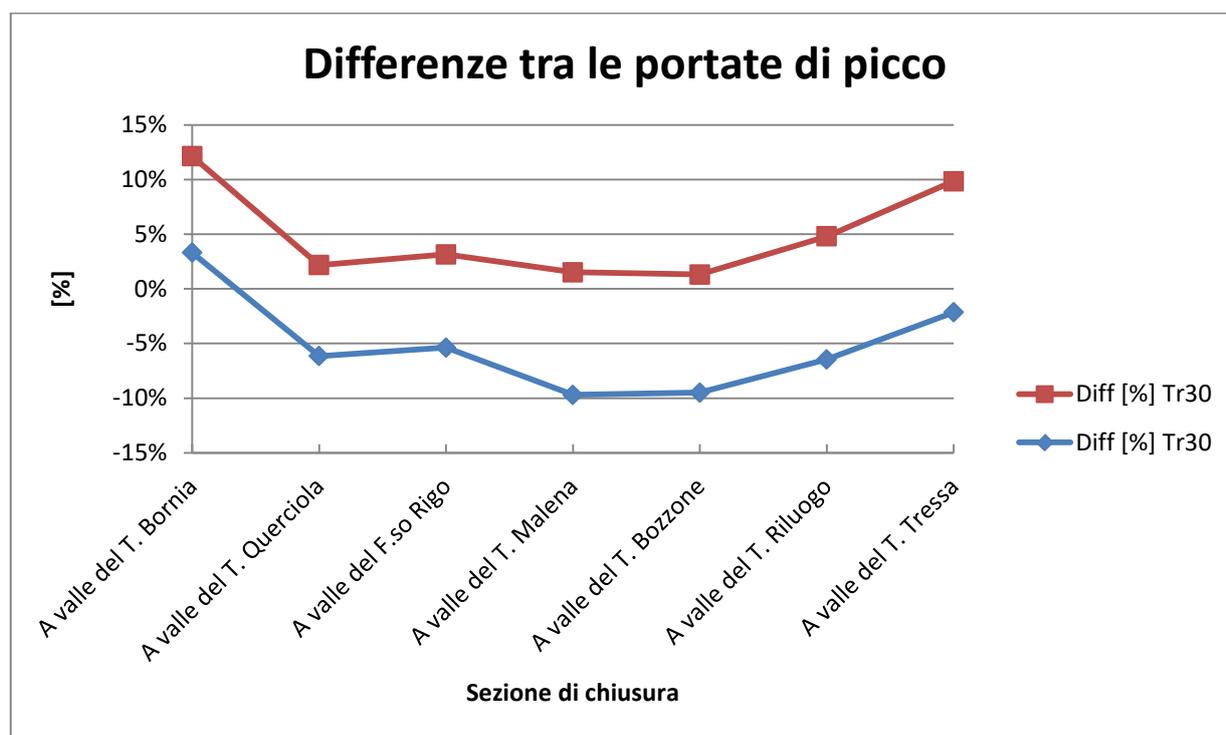


Figura 4.59 - differenza percentuale tra le portate di picco, in verde il tratto di F. Arbia che interferisce con i modelli studiati

Le differenze tra le portate di picco riprendono quanto esposto dalle differenze tra le altezze di pioggia, aumento meno marcati, se non negativi, per eventi di piena con Tr 30 anni ed aumenti maggiori per eventi con Tr 200 anni.

#### 4.3.6 Idrogrammi di progetto su hec-Ras

La modellazione idrologica fin qui esposta considera tutto il bacino idrografico a monte della sezione di chiusura per il calcolo dell'idrogramma di piena.

Ai fini della modellazione idraulica in ambiente Hec-Ras 5.0.7, l'idrogramma di un singolo affluente è stato calcolato come differenza tra gli idrogrammi relativi alle sezioni a monte e a valle della confluenza, calcolati lungo l'asta principale.

Nei casi in cui la differenza tra l'idrogramma di valle e di monte è negativa (caso presente in alcune fasi iniziali di salita degli idrogrammi), la differenza è stata assunta cautelativamente pari a zero.

Ad esempio sono mostrati di seguito gli idrogramma iniziali dell'evento Tr200 D10. L'idrogramma di monte (AR04) è maggiore dell'idrogramma di valle (AR05), tale condizione è dovuta ai diversi tempi di lag-time assegnati, i quali dipendono a loro volta dalla morfologia del bacino. In questo caso l'idrogramma da assegnare all'immissione laterale in ambiente Hec-Ras 5.0.7 sarebbe la differenza tra gli idrogrammi di valle e di monte, differenza negativa per il tratto in esame, cautelativamente assunta pari a zero.

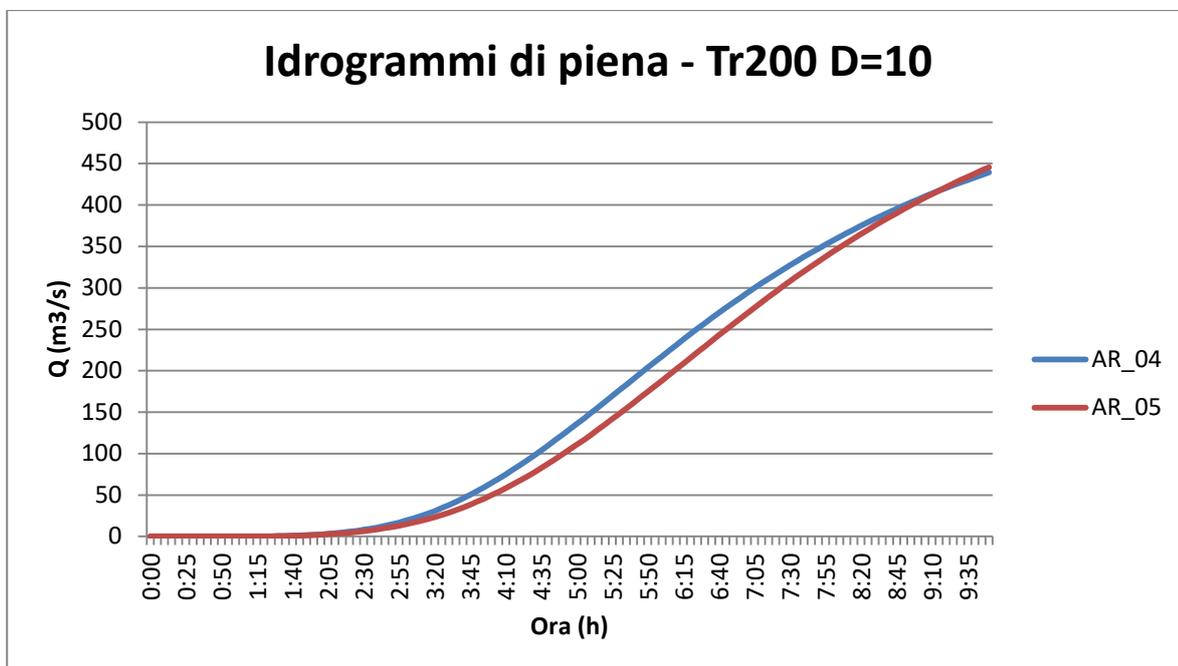


Figura 4.60 – idrogrammi per Tr200 D10 relativo ai bacini AR04 e AR05, nella fase di ascesa

## 5 ANALISI IDRAULICA

### 5.1 Descrizione della modellazione idraulica

Le modellazioni idrauliche sono state condotte per mezzo dei seguenti codici di calcolo: HEC-RAS 5.0.7, sviluppato dall'US Army Corps of Engineer, sia nelle modellazioni 1D e 2D, utilizzando le portate di piena ricavate dalle modellazioni idrologiche con HEC-HMS 4.2.1 descritte in precedenza.

Le modellazioni idrauliche sono state condotte secondo uno schema monodimensionale in moto vario (*unsteady flow*), simulando il deflusso delle portate di piena all'interno dell'alveo fluviale oggetto del presente studio.

Nei casi di superamento del livello dell'acqua dei limiti spondali o topografici delle sezioni utilizzate per le modellazioni monodimensionali, si sono svolte delle modellazioni bidimensionali sempre in ambiente HEC-RAS 5.0.7.

Le modellazioni idrauliche sono state svolte per eventi:

- Tr 30 anni, durata di pioggia: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 ore;
- Tr 200 anni, durata di pioggia: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 ore.

### 5.2 Modellazioni idrauliche monodimensionali con Hec-Ras 5.0.7

Per il T. Arbia oggetto di studio è stato sviluppato anzitutto un modello idraulico monodimensionale con il codice di calcolo HEC-RAS 5.0.7 e per ciascun tempo di ritorno di interesse (30 e 200 anni) e durata di pioggia (da 5 ore a 12 ore) è stata effettuata una simulazione in moto vario.

In questa sede, si preferisce omettere l'illustrazione teorica dei principi di base sui quali si fonda la soluzione numerica delle equazioni di moto e di continuità che regolano il processo di moto permanente e di moto vario, in quanto una esaustiva trattazione degli stessi argomenti è liberamente disponibile in rete all'indirizzo <http://www.hec.usace.army.mil> e si rimanda due pubblicazioni *Hydraulic Reference Manual* e *User's Manual* messe a disposizione direttamente dall'US Army Corps of Engineering.

Il codice HEC-RAS 5.0.7, al fine di seguire il calcolo, necessita, oltre della geometria dell'alveo tramite l'inserimento delle sezioni idrauliche (*cross section*), di definire il valore del coefficiente di Manning.



Sono state inserite 1539 sezioni idrauliche ricavate da morfologia Lidar per la caratterizzazione di circa 15.2 km di corso d'acqua. Gli attraversamenti infrastrutturali sono stati caratterizzati dall'inserimento di 5 elementi "bridge" ed 1 elemento "LID", quest'ultimo inserito per l'attraversamento della SS73 a nord di Taverne d'Arbia dato che è costituito da un viadotto che non interferisce con il deflusso idraulico.

La presenza di manufatti trasversali come soglie in calcestruzzo armato è stato modellato tramite l'inserimento di 3 elementi "inline structure".

In generale, si sono assunti valori medi del *Manning*, desunti dal Manuale di Hec-Ras e dal *Manuale dell'Ingegnere civile e ambientale* (Hoepli, 2015) pari a:

- $0.04 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$  corrispondente a un valore intermedio per alvei principali, puliti, tortuosi, con presenza di pozze e barre;
- $0.07 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$  corrispondente a un valore intermedio per alvei principali con folta vegetazione, profonde pozze o vie di deflusso con importanti trovanti;

Al fine di rendere eseguibili le simulazioni, occorre definire le *boundary conditions* a monte e a valle del tratto studiato nel caso di simulazioni in moto vario. Com'è noto tali condizioni possono essere impostate in vari modi: livello idrico noto, altezza critica, altezza di moto uniforme o scala di deflusso. Nel caso in esame, quali condizioni al contorno di monte sono stati assunti gli idrogrammi di piena; per la condizione di valle, invece, si è optato per la pendenza di moto uniforme, assunta pari alla pendenza del fondo alveo nel tratto terminale del corso d'acqua.

### 5.3 Modellazioni idrauliche bidimensionali - HEC-RAS 5.0.7

Il software HEC-RAS 5.0.7 permette di eseguire uno schema di modellazione bidimensionale all'interno della simulazione condotta in regime di moto vario. Nel presente studio si è fatto impiego di modelli 2D per la determinazione delle aree allagate, con modellazione in moto vario con schema monodimensionale (1D) combinato anche con uno schema bidimensionale (2D) con l'aggiunta di aree 2D (*2D-storage area*) nel modello. Tale area 2D viene aggiunta nel modello 1D disegnando un poligono connesso al *river* attraverso l'uso di sfioratori laterali (*lateral structure*) sia in destra che in sinistra idraulica per tutto il corso d'acqua.

Il codice HEC-RAS 5.0.7, al fine di seguire il calcolo del modello bidimensionale, necessita, oltre della geometria DTM del terreno desunta da Lidar, di definire il valore del coefficiente di Manning. In



generale, si sono assunti valori medi del *Manning*, desunti dal Manuale di Hec-Ras e dal *Manuale dell'Ingegnere civile e ambientale* (Hoepli, 2015) pari a:

-  $0.06 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$  corrispondente a un valore intermedio per "golene con sottobosco/ aree coltivate/con molti alberi per le aree modellate bidimensionalmente.

Al fine di rendere eseguibili le simulazioni, occorre definire le *boundary conditions* a valle delle aree di calcolo bidimensionale, in questo caso sono state assegnate le pendenze di moto uniforme a distanza sufficiente da non influire sul profilo delle tirante idraulico dell'area oggetto di studio.

Il codice di calcolo consente di risolvere il problema bidimensionale del moto sia risolvendo le equazioni complete di Saint Venant o di diffusione dell'onda in 2D. In generale, le equazioni di diffusione dell'onda (scelte ai fini del presente studio) consentono al codice di funzionare più velocemente garantendo inoltre una maggiore stabilità numerica. L'algoritmo di risoluzione è "*ai volumi finiti*" ed è "accoppiato" a quello di risoluzione del problema monodimensionale nello stesso passo temporale di calcolo. Questo permette una perfetta coerenza a ogni passo temporale tra le componenti monodimensionali e quelli bidimensionali. L'equazione dello stramazzo è utilizzata per calcolare il deflusso tra le sezioni del corso d'acqua modellato e la *storage area 2D*.

HEC-RAS 5.0.7 funziona per celle, che però possono essere sia strutturate che non strutturate. Ciò significa che le celle computazionali possono essere triangoli, quadrate, rettangolari o anche elementi a cinque e sei facce (ma non più di 8). La maglia può essere una miscela di forme e dimensioni delle celle (Figura 5.1). Il contorno esterno della maglia computazionale è definito, invece, con un poligono. Generalmente, come si nota in Figura 5.1, il software crea delle celle di forma quadrata nella zona centrale, mentre in prossimità del contorno esterno la mesh si adatta al profilo dell'area.

Si noti inoltre come ogni *cell center*, *cell face* e *cell face point* è identificato da un numero, in modo da facilitare l'operazione di analisi e visualizzazione dei risultati.

Il più grande vantaggio della modellazione bidimensionale in HEC-RAS riguarda comunque la dimensione della mesh computazionale. Ogni cella viene infatti pre-processata in modo da creare una serie di tabelle idrauliche, che mettono in relazione l'elevazione e il volume e, su ogni lato della cella, l'elevazione con il perimetro bagnato, l'area e la scabrezza. Queste curve permettono di utilizzare celle di dimensioni più grandi rispetto ad altri programmi 2D, con evidente diminuzione dei tempi computazionali.



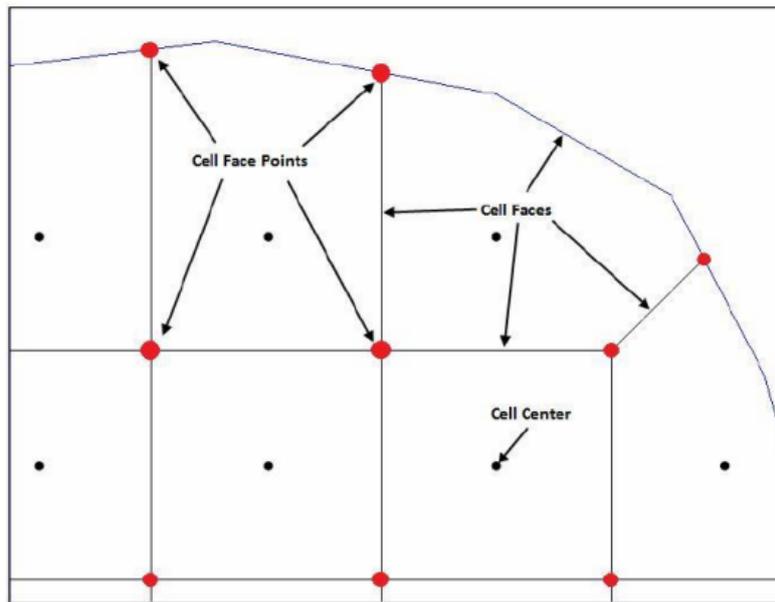


Figura 5.1 - Esempio mesh computazionale HEC-RAS 5.0.7

Ad ogni modo, in una simulazione di moto vario bidimensionale, il parametro più significativo da considerare è l'intervallo computazionale  $\Delta T$ , che deve essere scelto con accuratezza in modo da non influenzare negativamente l'esito delle analisi. Generalmente questo valore viene valutato basandosi sul criterio di Courant, esprimibile, nel caso di impiego del set di equazioni *diffusive wave*, nella maniera seguente:

$$C = \frac{V \Delta T}{\Delta X} \leq 2$$

essendo  $C$  il numero di Courant,  $V$  la velocità massima dell'acqua,  $\Delta T$  il tempo di calcolo e  $\Delta X$  la dimensione media delle celle.

Infine, occorre sottolineare che il software computa la velocità della corrente nei nodi della griglia, mentre il livello idrico è calcolato nel *cell center* della griglia stessa.

### 5.3.1 Modello geometrico DTM del terreno

Il modello geometrico del terreno si è basato sulla cartografia LIDAR disponibile, tramite mosaico dei fogli in formato ascii georiferiti in coordinate Gauss Boaga (Monte Mario 1940), con risoluzione 1m x 1m.

Il volo Lidar è stato effettuato nel 2008, da allora non sono pervenute modifiche morfologiche tali da richiedere una rivisitazione del DTM, il T. Arbia scorre prevalentemente in un ambiente poco antropizzato.

Di seguito l'immagine del modello DTM del terreno.

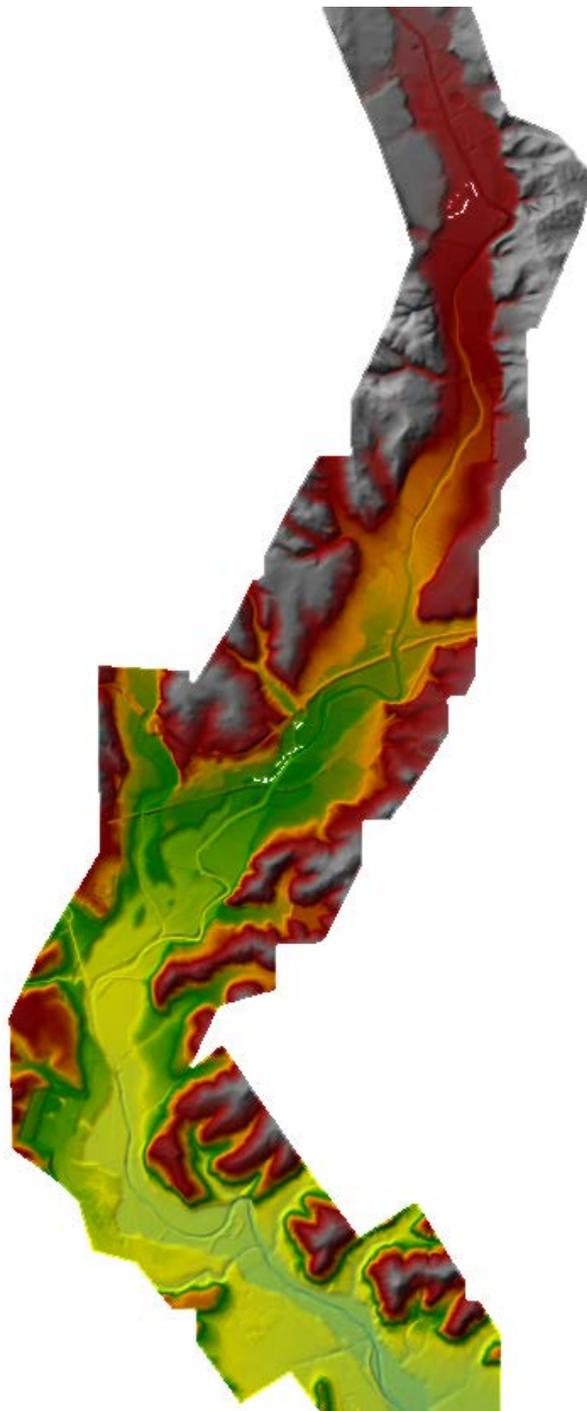


Figura 5.2 – DTM modello idraulico T. Arbia

Gli unici elementi che hanno richiesto una modifica al DTM sono le zone:

- Taverne d'Arbia, a seguito della realizzazione e il collaudo delle opere idrauliche arginali a difesa dell'abitato;
- Area a sud di Pianella, loc. Rondinella.

### 5.3.2 Modifiche al modello geometrico DTM del Terreno: opere idrauliche a protezione di Taverne d'Arbia

L'abitato di Taverne d'Arbia è stato oggetto di lavori di mitigazione del rischio idraulico tramite la realizzazione di arginature di cui al progetto esecutivo *“Interventi di mitigazione del rischio idraulico degli abitati di Taverne d'Arbia e Arbia nei Comuni di Siena, Castelnuovo Berardenga e Asciano 1<sup>a</sup> Stralcio – Lotto I”*.

Dalle figure seguenti (Ortofoto Regione Toscana) è possibile vedere la realizzazione degli interventi tra il 2013 e il 2016. Ad oggi risultano conclusi.



Figura 5.3 – Ortofotocarta Regione Toscana 2013



**Figura 5.4** – Ortofotocarta Regione Toscana 2016

Il DTM di base desunto dalla cartografia Lidar è stato aggiornato tramite la realizzazione di un apposito DTM dello stato attuale, ricostruito sulla base dei rilievi planoaltimetrici as-built eseguiti dalla Regione Toscana e messi a disposizione del Genio Civile Valdarno Superiore.

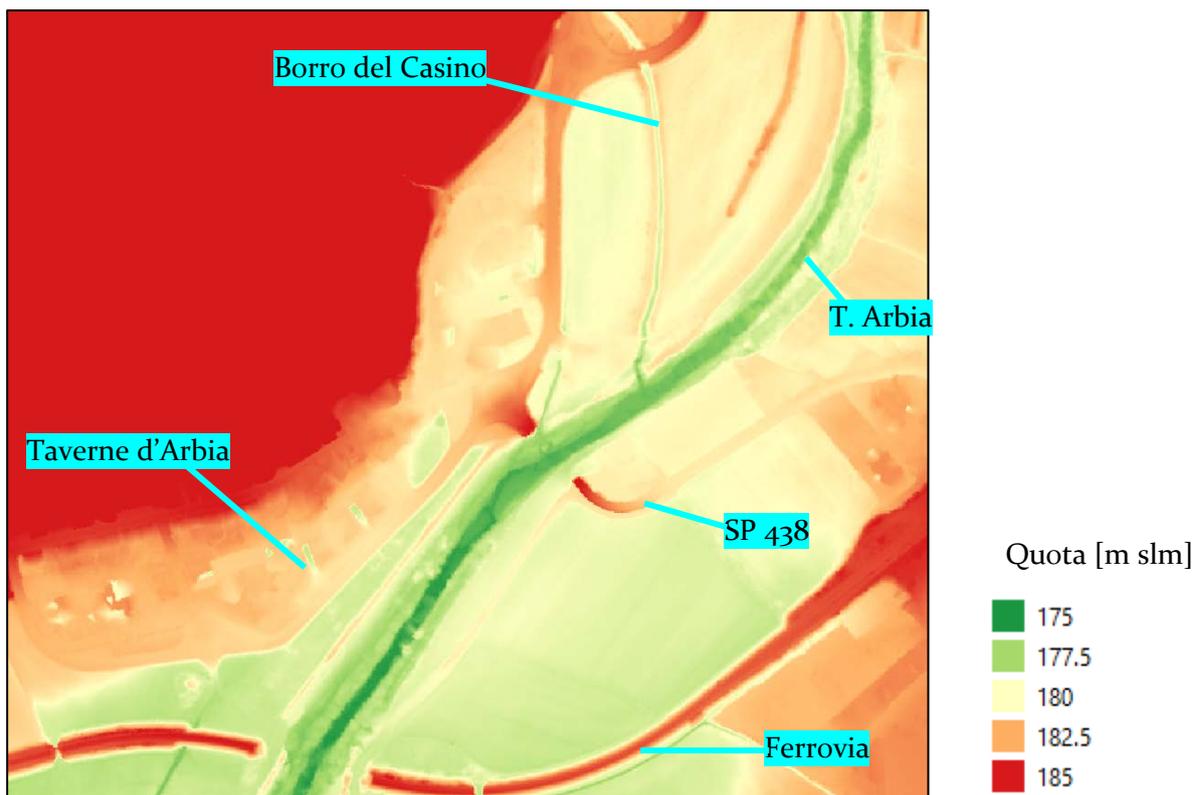


Figura 5.5 - DTM da cartografia Lidar, anno 2008



Figura 5.6 - DTM da cartografia Lidar, anno 2008, con sovrapposizione del DTM degli argini

Allo stato attuale sono stati realizzati gli argini, ma sono comunque presenti due sottoattraversamenti del rilevato costituiti da condotte DN1000 funzionali all'allontanamento delle acque meteoriche tramite fognatura bianca dall'abitato di Taverne d'Arbia verso il Torrente.

La realizzazione di apposite strutture con valvole antiriflusso, che impediranno la risalita delle acque proveniente dal T. Arbia attraverso la rete fognaria, è attualmente oggetto di progettazione, per cui nel presente modello sono stati realizzati due elementi tramite "SA/2D Area connection" che rappresentano il collegamento idraulico esistente.

### 5.3.3 Modifiche al modello geometrico DTM del Terreno: area a sud di Pianella, loc. Rondinella

A sud di Pianella, in destra idrografica del T. Arbia è possibile osservare dalla cartografia Lidar una morfologia del terreno riferita al 2008 non più attuale. Dalle figure seguenti è possibile vedere la differenza morfologica con riferimento all'ortofotocarta 2016 Regione Toscana.

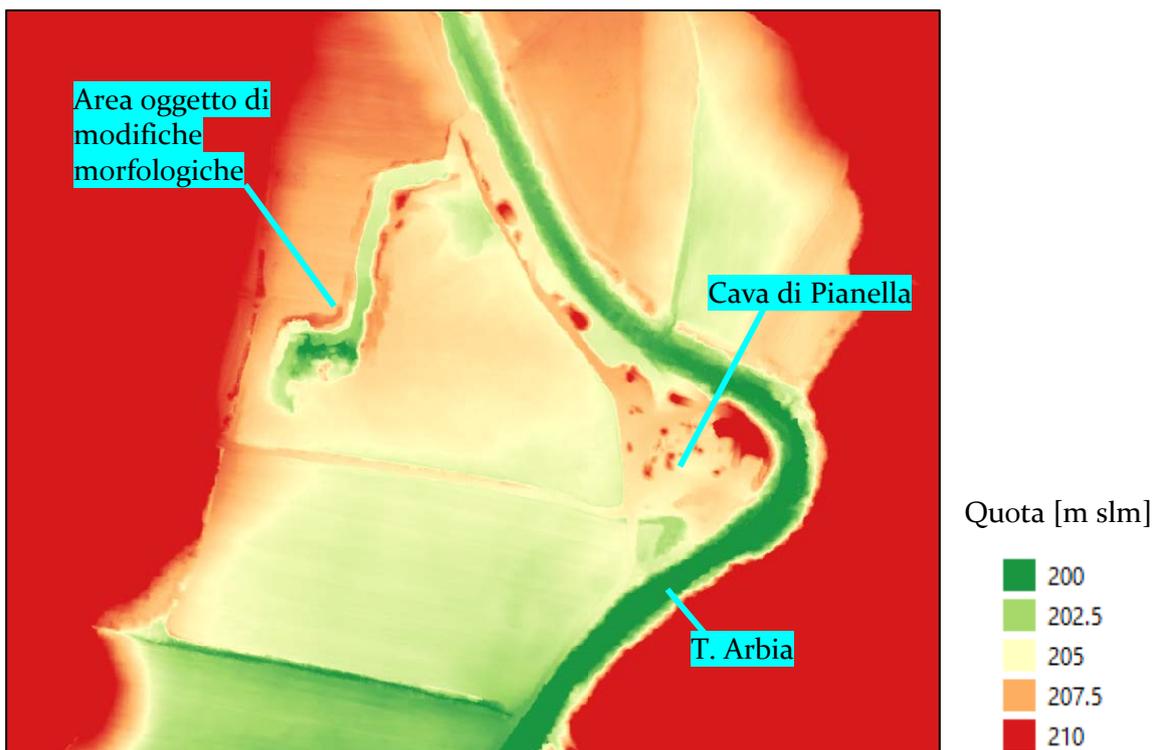
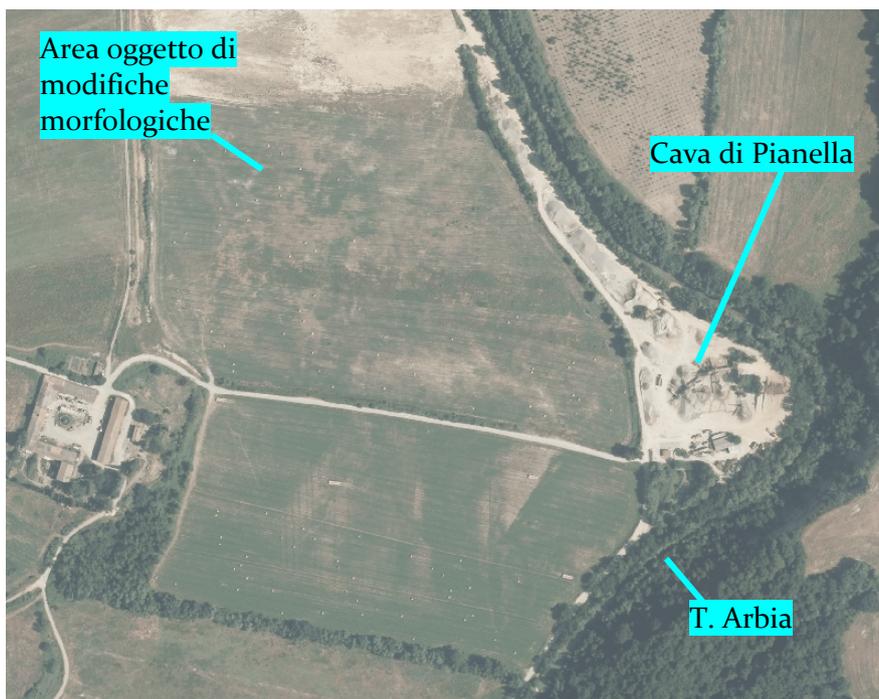
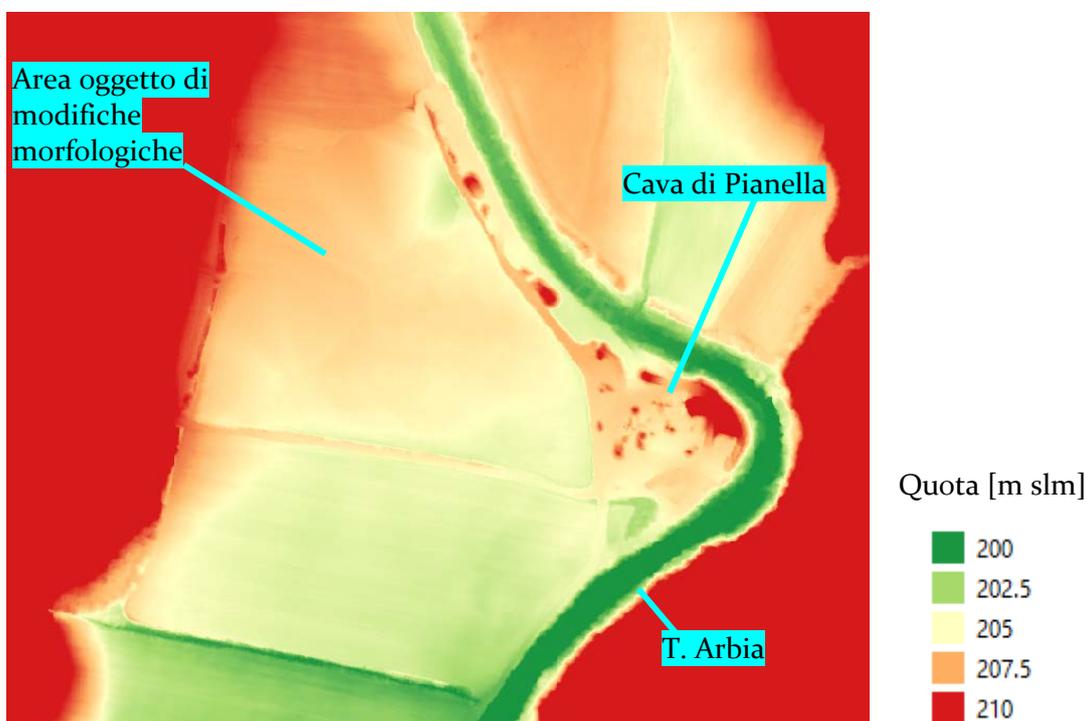


Figura 5.7 – Area a sud di Pianella – morfologia DTM da Lidar 2008



**Figura 5.8** – Ortofotocarta 2013 Regione Toscana – l’area oggetto di modifiche morfologiche nel 2008 non è più presente

A seguito della verifica della diversità rispetto alla morfologia Lidar, è stato realizzato un modello DTM che tenga conto dello stato attuale, mostrato di seguito.



**Figura 5.9** – DTM da cartografia Lidar, anno 2008, con sovrapposizione del DTM dello stato attuale



## 6 MAPPA DELLE AREE A PERICOLOSITA' D'ALLUVIONE

Le perimetrazioni delle aree a pericolosità d'alluvione sono state eseguite sulla base dei risultati delle modellazioni precedentemente descritte, nel seguente modo (art. 2 LR 41/2018):

- Aree a pericolosità d'alluvione frequente (per  $Tr \leq 30$  anni) – P<sub>3</sub>;
- Aree a pericolosità d'alluvione poco frequente ( $30 < Tr \leq 200$  anni) – P<sub>2</sub>;
- Aree a pericolosità d'alluvione rara ( $200 < Tr \leq 500$  anni) – P<sub>1</sub>;

Per la definizione delle aree a pericolosità d'alluvione rara si è fatto riferimento a criteri storico-inventariali.

Le perimetrazioni delle classi di pericolosità sopra definite sono state eseguite sulla base dei risultati delle modellazioni idrologiche e idrauliche per le durate critiche individuate e disegnate sul dettaglio della CTC del Comune di Siena in scala 1:2.000. Le mappe di pericolosità, battente, velocità e magnitudo sono state restituite in scala 1:10.000 su Cartografia Tecnica Regionale.

La perimetrazione delle aree a pericolosità d'alluvione rara (eventi con  $200 < Tr \leq 500$  anni) è stata eseguita sulla base delle informazioni storico inventariali esistenti riguardanti aree inondabili da eventi eccezionali e quelle ottenute dallo strato informativo derivante dalla cartografia di Pericolosità Idraulica di PS e dal PGRA dell'Autorità di Bacino Distrettuale del Bacino Settentrionale.





## 7 MAPPA DEI BATTENTI, DELLE VELOCITÀ E DELLA MAGNITUDO IDRAULICA

Al fine di implementare le mappe di pericolosità da alluvione e rischio alluvione, comprensive di battenti e velocità necessari per l'applicazione della L.R. 41/2018, sono redatte le carte dei battenti e quella delle velocità della corrente sulla base dei risultati raster messi a disposizione dai software di calcolo (Hec-Ras 5.0.7).

Secondo le definizioni dell'Art. 2 della L.R. 41/2018 è definito "battente" l'altezza della lama d'acqua in una determinata area associata allo scenario relativo alle alluvioni poco frequenti.

Si definisce "magnitudo idraulica": la combinazione del battente e della velocità della corrente in una determinata area, associata allo scenario relativo alle alluvioni poco frequenti:

- **magnitudo idraulica moderata:** valori di battente inferiore o uguale a 0,5 metri e velocità inferiore o uguale a 1 metro per secondo (m/s). Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente uguale o inferiore a 0,3 metri;
- **magnitudo idraulica severa:** valori di battente inferiore o uguale a 0,5 metri e velocità superiore a 1 metro per secondo (m/s) oppure battente superiore a 0,5 metri e inferiore o uguale a 1 metro e velocità inferiore o uguale a 1 metro per secondo (m/s). Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente superiore a 0,3 metri e inferiore o uguale a 0,5 metri;
- **magnitudo idraulica molto severa:** battente superiore a 0,5 metri e inferiore o uguale a 1 metro e velocità superiore a 1 metro per secondo (m/s) oppure battente superiore a 1 metro. nei casi in cui la velocità non sia determinata battente superiore a 0,5 metri.

Per la definizione delle aree allagate è stato realizzato un inviluppo del perimetro massimo di allagamento con taglio del battente a 3 cm (ad esclusione delle zone di transito). L'inviluppo ha riguardato tutte le durate di pioggia per ogni tempo di ritorno considerato.

Il raster dei battenti idraulici relativi alle aree a pericolosità da alluvione poco frequente, è stato realizzato mediante inviluppo dei battenti idraulici massimi per tutte le durate di pioggia considerate.

Il raster della velocità relativa alle aree a pericolosità da alluvione poco frequente, è stato realizzato mediante il valore delle velocità corrispondenti al battente d'inviluppo.



Il raster della magnitudo idraulica è stato realizzato combinando il raster dei battenti con idraulici il raster della velocità.

Se ad esempio in una cella del raster si trovano i seguenti valori, come risultato di tre differenti durate di pioggia.

|                 | <b>Battente idraulico [m]</b> | <b>Velocità [m/s]</b> |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------|
| <b>Tr200 D3</b> | 0.35                          | 1.66                  |
| <b>Tr200 D4</b> | 0.42                          | 1.71                  |
| <b>Tr200 D5</b> | 0.56                          | 1.62                  |

**Tabella 6.1** – esempio di risultato su una singola cella del modello idraulico

Le relative celle dei raster di battente idraulico, velocità e magnitudo idraulica sono le seguenti.

| <b>Raster dei battenti idraulici - inviluppo</b> | <b>Raster delle velocità - inviluppo</b> | <b>Raster magnitudo idraulica</b>       |
|--|--|---|
| Battente idraulico = 0.56 m                      | Velocità = 1.62 m/s                      | Battente idraulico = 0.56 m             |
| relativo a Tr 200 D5                             | relativo a Tr 200 D5                     | Velocità = 1.62 m/s                     |
|  |  | relativo a Tr 200 D5                    |
|  |  | <b>Magnitudo idraulica Molto Severa</b> |

**Tabella 6.2** – esempio valori su una singola cella dei raster di di battente idraulico, velocità e magnitudo idraulica



## 8 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente studio idrologico ed idraulico è stato redatto su incarico del Comune di Siena, con nota di assenso dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, nell'ambito dell'aggiornamento del quadro conoscitivo di Piano Strutturale utilizzando anche le risorse e le indicazioni regionali per la realizzazione di studi per l'implementazione delle mappe di pericolosità da alluvione e rischio di alluvioni, comprensive di carte dei battenti, velocità e magnitudo idraulica.

A tal fine, si sono svolte le seguenti attività:

- Attività sul campo, consistenti in sopralluoghi delle aree oggetto dello studio e reperimento della documentazione riportata nei capitoli precedenti;
- Modellazione idrologica, tramite software HEC-HMS con applicazione del modello di infiltrazione dell'SCS-CN e di formazione dell'onda di piena (SCSC-CN e Kinematic Wave);
- Modellazione idraulica 1D e 2D con HEC-RAS 5.0.3 e 5.0.7;
- Redazione degli elaborati grafici delle mappe di pericolosità, battenti, velocità e magnitudo.

La definizione delle aree a pericolosità d'alluvione deriva da valutazioni ed elaborazioni sviluppate tramite modelli informatici basati su dati, conoscenze e parametri vigenti allo stato attuale.

Qualsiasi modifica di tali condizioni, su cui sono state elaborate le valutazioni di carattere idrologico idraulico, pregiudicano la validità di quanto esposto e potrebbero rendere necessaria una rivalutazione del quadro conoscitivo.

Occorre osservare che i risultati del presente studio sono vincolati al mantenimento delle attuali condizioni e assetti del reticolo idrografico; eventuali future modifiche di tali assetti impongono la necessità di una revisione dei presenti risultati.

Inoltre si ritiene doveroso osservare che tali risultati dovranno essere aggiornati anche in conseguenza di una possibile futura espansione edilizia, dell'eventuale approvazione di varianti al regolamento urbanistico, delle variazioni significative dell'assetto dell'uso del suolo o delle reti idrauliche naturali e artificiali interferenti con le aree investigate.





Arezzo, febbraio 2020

I professionisti incaricati

Geol. Massimiliano Rossi

Ing. Davide Giovannuzzi

Geol. Fabio Poggi

Ing. Mirko Frasconi

