

# Comune di Chiusdino

Provincia di Siena



## INDAGINI IDROLOGICO-IDRAULICHE A SUPPORTO DEL REGOLAMENTO URBANISTICO DEL COMUNE DI CHIUSDINO



Studio di Ingegneria

Ing. Alessio Gabrielli

Via Donizetti, 52 - 50018 Scandicci (FI)

Tel. 055/7373420 - Fax. 055/7373422

E-mail: gabbrielli@comail.it

**Il Progettista:**

Ing. Alessio Gabrielli

**COMUNE DI CHIUSDINO**

**Il Dirigente:**

Geom. Marco Burchianti

**Il Sindaco:**

Ivano Minocci

**Oggetto:**

RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA

PROGETTO

L 1 1 4

TIPOLOGIA

R E L

NUMERO

0 0 1

REVISIONE

A

SCALA

-----

DATA

MAGGIO 2012

REV.	DESCRIZIONE	EMESSO	DATA	VERIFICATO	DATA	APPROVATO	DATA
A	PRIMA EMISSIONE	GABBRIELLI	MAGGIO 2012	GABBRIELLI	MAGGIO 2012	GABBRIELLI	MAGGIO 2012

## INDICE

<b>1. PREMESSE</b>	<b>2</b>
<b>2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E NORMATIVO</b>	<b>3</b>
2.1 DESCRIZIONE DELLE AREE E DEI CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO	3
2.2 STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE E CLASSIFICAZIONE IDRAULICA	5
2.3 ALTRE AREE OGGETTO DI PREVISIONE URBANISTICA	9
<b>3. MODELLISTICA IDROLOGICA</b>	<b>11</b>
3.1 IL CODICE DI CALCOLO ALTO	11
3.2 STIMA DELLE PORTATE FOSSO FIUMARELLO	13
3.3 STIMA DELLE PORTATE FOSSO LE STREGGE E AFFLUENTI	16
3.4 STIMA DELLE PORTATE TORRENTE TRISONDOLA	19
<b>4. MODELLISTICA IDRAULICA</b>	<b>22</b>
4.1 APPROCCIO METODOLOGICO	22
4.2 IL CODICE DI CALCOLO HEC-RAS 4.1.0	22
4.3 MODELLO IDRAULICO FOSSO FIUMARELLO	24
4.4 MODELLO IDRAULICO FOSSO LE STREGGE E AFFLUENTI	26
4.5 MODELLO IDRAULICO TORRENTE TRISONDOLA	30
<b>5. RISULTATI DELLE MODELLAZIONI IDRAULICHE</b>	<b>32</b>
5.1 CONSIDERAZIONI SULLE MODELLAZIONI E INDIVIDUAZIONE DELLE CRITICITÀ	32
5.2 DETERMINAZIONE DELLE AREE ALLAGABILI E DELLE PERICOLOSITÀ	34
<b>6. CONCLUSIONI</b>	<b>35</b>
<b>ELABORATI GRAFICI</b>	<b>36</b>
<b>ALLEGATI</b>	<b>36</b>

## **1. PREMESSE**

Il presente lavoro ha come obiettivo le verifiche idrologico-idrauliche di alcuni corsi d'acqua ricadenti sul territorio comunale di Chiusdino al fine di definire la pericolosità idraulica da essi determinata lungo i tratti adiacenti ad aree oggetto di previsione urbanistica.

Con la richiesta di integrazioni n. 303379 del 02 dicembre 2011 l'Ufficio del Genio Civile di Siena ha indicato i corsi d'acqua di cui necessita un approfondimento, ed in particolare:

- Fosso Fiumarello, lungo il tratto contiguo all'area D2p destinata ad insediamenti produttivi posta ad Ovest di Montalcinello sul confine con il comune di Radicondoli;
- Fosso Le Stregge e suoi affluenti interferenti con l'area D1p destinata ad insediamenti produttivi (ampliamento centrale geotermica Enel Green Power "Chiusdino 1") nell'UTOE di Chiusdino 2;
- Torrente Trisondola lungo il tratto contiguo all'area D2p destinata ad insediamenti produttivi nell'UTOE Chiusdino 2.

Il Comune di Chiusdino ha adottato il nuovo Regolamento Urbanistico, a supporto del quale è redatto il presente studio, con D.C.C. n. 51 del 30 settembre 2011, pertanto dal punto di vista delle indagini geologico tecniche, ivi comprese le indagini idrauliche, si fa riferimento al D.P.G.R. 26/R/2007 in cui sono richieste verifiche idrauliche per i tratti dei corsi d'acqua interferenti con le UTOE per eventi di piena con tempi di ritorno pari a 20, 30, 100 e 200 anni.

Il lavoro si compone innanzitutto di una parte introduttivo-descrittiva, in cui vengono analizzate le caratteristiche generali delle aree oggetto di previsione e dei corsi d'acqua adiacenti ad esse, nonché illustrati i principali strumenti conoscitivi e di pianificazione del territorio che caratterizzano tali aree.

Di seguito viene affrontata l'analisi idrologica dei bacini dei corsi d'acqua in esame attraverso il confronto tra i dati disponibili della "Regionalizzazione delle portate di piena in Toscana" (agg. 2007) elaborati con il software AIto2000 e i dati derivanti da nuove elaborazioni compiute sulla base di una ridefinizione dei principali parametri geomorfologici dei bacini ideografici, fino all'individuazione delle portate di piena per i tempi di ritorno considerati.

Successivamente vengono illustrati i modelli idraulici predisposti per i corsi d'acqua in oggetto, sia in termini di rappresentazione geometrica, condizioni e parametrizzazione, sia in termini di interpretazione e restituzione analitica e grafica dei risultati, fino alla rappresentazione delle aree allagabili.

## 2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E NORMATIVO

### 2.1 *Descrizione delle aree e dei corsi d'acqua oggetto di studio*

Le aree oggetto di studio sono situate in punti diversi del Comune di Chiusdino, ma entrambe in prossimità del confine comunale, in zone collinari.

I corsi in oggetto sono studiati nei sostanzialmente nei loro tratti montani, che presentano bacini di piccole dimensioni e reticolo poco gerarchizzato.

L'area D2p lungo il Fosso Fiumarello è posta esattamente sul confine con il Comune di Radicondoli, appena fuori l'abitato di Montalcinello, lungo la provinciale n. 107 che porta proprio a Radicondoli.

Essa si trova sul fondovalle del corso d'acqua che, come anche per le altre aree, presenta un'acclività abbastanza pronunciata e il Fosso Fiumarello piuttosto incassato.

La quota altimetrica a cui è posta l'area D2p in oggetto varia tra circa 354 m s.l.m. lungo la strada fino a circa 330 m s.l.m. in prossimità del corso d'acqua, con una distanza variabile in linea d'aria tra strada e corso d'acqua di circa 150-200 m.

Proprio sul confine comunale si trova una strada bianca che porta ad un pozzo geotermico che alimenta la vicina centrale geotermoelettrica Enel Green Power di "Radicondoli 1", e che proseguendo conduce ad un guado a ruota bagnata.

Il Fosso Fiumarello è un corso d'acqua con caratteristiche torrentizie che nasce sui rilievi circostanti nel Comune di Radicondoli e, alla sezione posta a valle dell'area D2p oggetto di verifica, presenta un bacino idrografico di circa 3.488 kmq.

L'asta del Fiumarello, lungo il tratto analizzato, risulta del 3° ordine (secondo la gerarchizzazione di Horton-Strahler) e, in destra idraulica, riceve le acque di alcuni piccoli affluenti del 2° ordine come il Botro Sordo e il Fosso dell'Acqua Viva, completamente ricadenti sul territorio di Radicondoli.

Le caratteristiche torrentizie del corso d'acqua determinano, in caso di piena, un trasporto da parte della corrente di materiale anche molto grossolano, e se ne ha riscontro nei punti in cui l'alveo si presenta più ampio e con pendenza ridotta, come un prossimità degli attraversamenti; dal punto di vista della vegetazione ripariale, si osserva una totale mancanza di manutenzione che determina in alcuni punti quasi l'occlusione dell'alveo stesso, in particolare ad opera di vegetazione infestante, cespugli, arbusti.

Le altre 2 aree oggetto di previsione sono situate in una zona diversa del territorio comunale di Chiusdino, ad Ovest del capoluogo, lungo il confine con il Comune di Montieri.

Esse si trovano sul fondovalle del Torrente Trisondola, affluente del Torrente Saio, a sua volta del Torrente Feccia, a sua volta del Fiume Merse.

Anche in questo caso ci troviamo in prossimità della sorgente dei rami fluviali studiati, con aste del 1°, 2° o al massimo 3° ordine e bacini piuttosto piccoli.

L'area D1p è caratterizzata dalla presenza della centrale geotermoelettrica Enel Green Power di "Chiusdino 1", di recente realizzazione (inaugurata nel 2011).

La quota altimetrica dell'area è sostanzialmente omogenea, intorno ai 411-412 m s.l.m.; sono invece assai pendenti i corsi d'acqua che la lambiscono, ovvero il Fosso Le Stregge e due suoi affluenti in destra e sinistra idraulica.

Il Fosso Le Stregge, che presenta un bacino idrografico di soli 0.439 kmq, attraversa completamente l'area D1p a mezzo di un tombamento realizzato contestualmente alla realizzazione della centrale Enel.

A monte di detto tombamento è stata costruita anche un "vasca" di accumulo del materiale flottante dotata di griglia di trattenuta a valle della quale, dopo un piccolo salto idraulico, l'acqua è incanalata fino al tombamento ("finsider" 2.30×1.60); tutta l'opera è realizzata in gabbioni in pietra e legname.

Il tombamento restituisce a valle della centrale dove è stata realizzata un'opportuna opera di protezione delle sponde (cls e gabbioni) e dove il Fosso Le Stregge incontra l'Affluente Sinistro che costeggia sul lato Est tutta l'area di centrale.

L'Affluente Sinistro risulta assai incassato, con quote d'alveo inferiori di almeno 3 metri rispetto al piazzale dell'area di centrale; ad esso afferisce, alla confluenza con Le Stregge, un bacino di circa 0.118 kmq.

L'Affluente Destro del Fosso Le Stregge è invece un corso d'acqua che proviene dal versante Ovest quasi parallelo a Le Stregge stesso, ma più a Sud rispetto a quest'ultimo.

L'Affluente Destro attraversa la strada vicinale che conduce alla centrale proprio prima di arrivarvi, e poi vi scorre adiacente fino a confluire ne Le Stregge a valle della centrale.

Anche nel caso di questo corso d'acqua, in occasione della realizzazione della centrale Enel, è stato adeguato l'attraversamento sulla strada vicinale mediante un'opera di protezione in gabbioni con piccola vasca antistante il tombino (sezione circolare D=80 cm) e protezione in gabbioni anche a valle.

Come nel caso del Fosso Fiumarello, le caratteristiche torrentizie dei corsi d'acqua determinano, in caso di piena, un trasporto da parte della corrente di materiale anche molto grossolano; i manufatti di protezione appena descritti consentono di limitare questo fenomeno a monte dell'area di centrale, anche se soltanto per il Fosso Le Stregge è stata prevista una griglia di trattenuta del materiale trasportato, flottante o non; anche dal punto di vista della manutenzione dei corsi d'acqua si constata un discreto livello di pulizia lungo le sponde dei corsi d'acqua, nei soli tratti vicini alla centrale.

L'altra area oggetto di previsione è situata poco più a monte rispetto alla centrale "Chiusdino 1", sempre lungo la stessa strada vicinale.

In questo caso il corso d'acqua potenzialmente interferente con essa risulta il Torrente Trisondola, corso d'acqua principale della zona.

L'area D2p si sviluppa sul fondovalle del Trisondola, in sponda sinistra, e presenta quote assai variabili tra la prossimità della strada (circa 425 m s.l.m.) e il corso d'acqua (circa 398 m s.l.m.).

Sul lato Sud di questa area si trova una stradella che porta ad un guado.

Lungo il tratto del corso d'acqua che costeggia l'area D2p, nella porzione più a Nord, il torrente tende ad "incassarsi", le sponde diventano assai scoscese e aumenta la differenza di quota tra l'alveo e le aree adiacenti; ciò è in qualche modo già evidenziato dalla C.T.R. in cui è rappresentata una scarpata (*layer 601*).

Il Torrente Trisondola, nel tratto studiato, è caratterizzato da un'asta del 3° ordine, e, alla sezione posta a valle dell'area oggetto di studio, presenta chiude un bacino idrografico di circa 4.311 kmq.

Oltre a sottolineare anche per questo corso d'acqua il carattere marcatamente torrentizio con conseguente trasporto di materiale grossolano, si osserva come la vegetazione intorno alle sponde sia piuttosto fitta, soprattutto nel tratto prospiciente l'area oggetto di previsione.

## 2.2 Strumenti di pianificazione e classificazione idraulica

Le aree oggetto di studio sono rappresentate nella Tav. 6 del Regolamento Urbanistico del Comune di Chiusdino adottato con D.C.C. n. 51 del 30 Settembre 2011.

Nelle seguenti figure sono mostrati gli estratti di detto elaborato per ciascuna delle 3 aree.

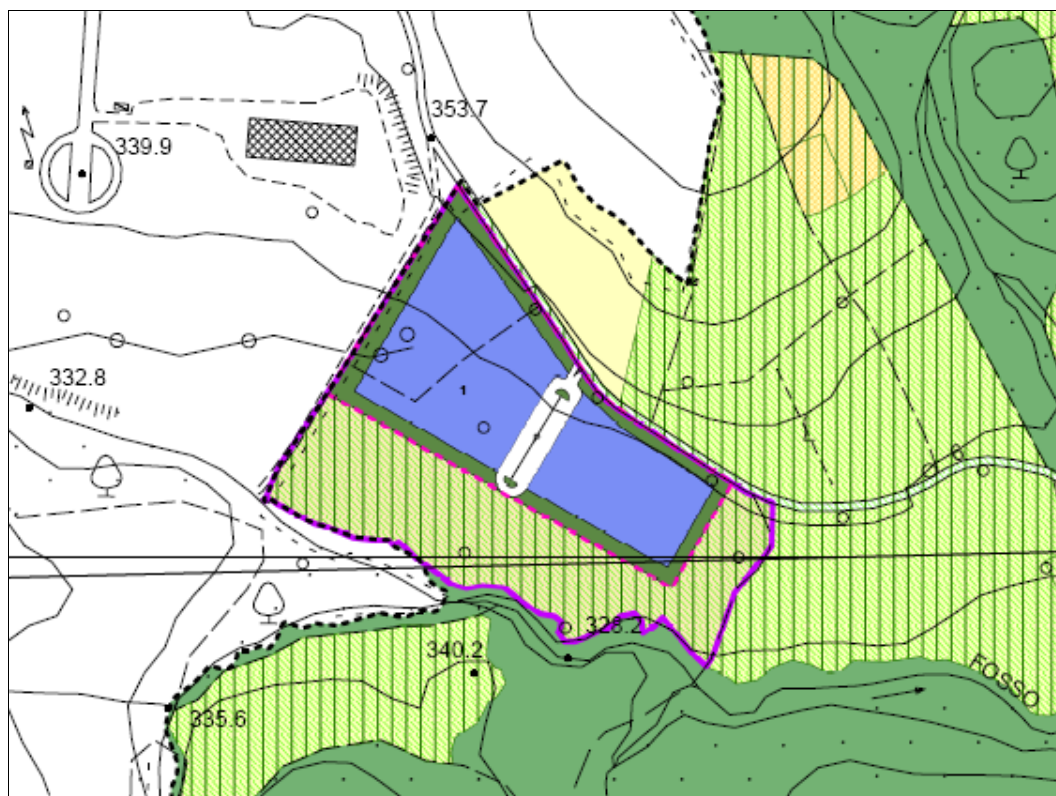


Fig. 1 – Area D2p lungo il Fosso Fiumarello

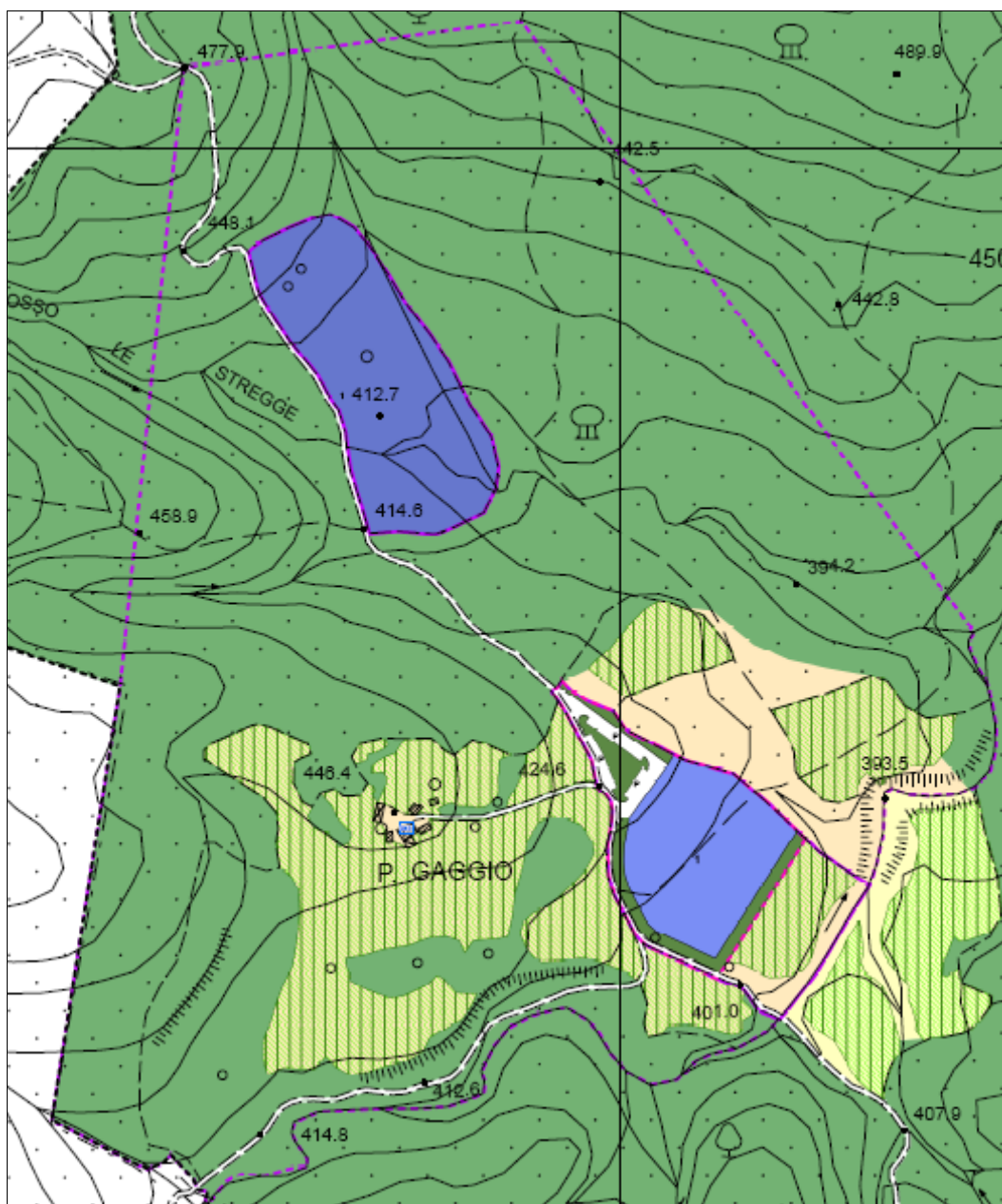


Fig. 2 – Area D1p lungo il Fosso Le Stregge (Centrale geotermica “Chiusdino 1”) e Area D2p lungo il Torrente Trisondola

Dal punto di vista della pericolosità idraulica sono disponibili, nel Piano Strutturale comunale approvato con D.C.C. 64/2008, la carta della pericolosità idraulica e degli ambiti fluviali e la carta di adeguamento al P.A.I. del Fiume Ombrone (con perimetrazioni redatte in ottemperanza agli artt. 8, 9 e 16 delle N.T.A. del Piano), di cui sono mostrati di seguito gli estratti relativi alle aree oggetto di studio.

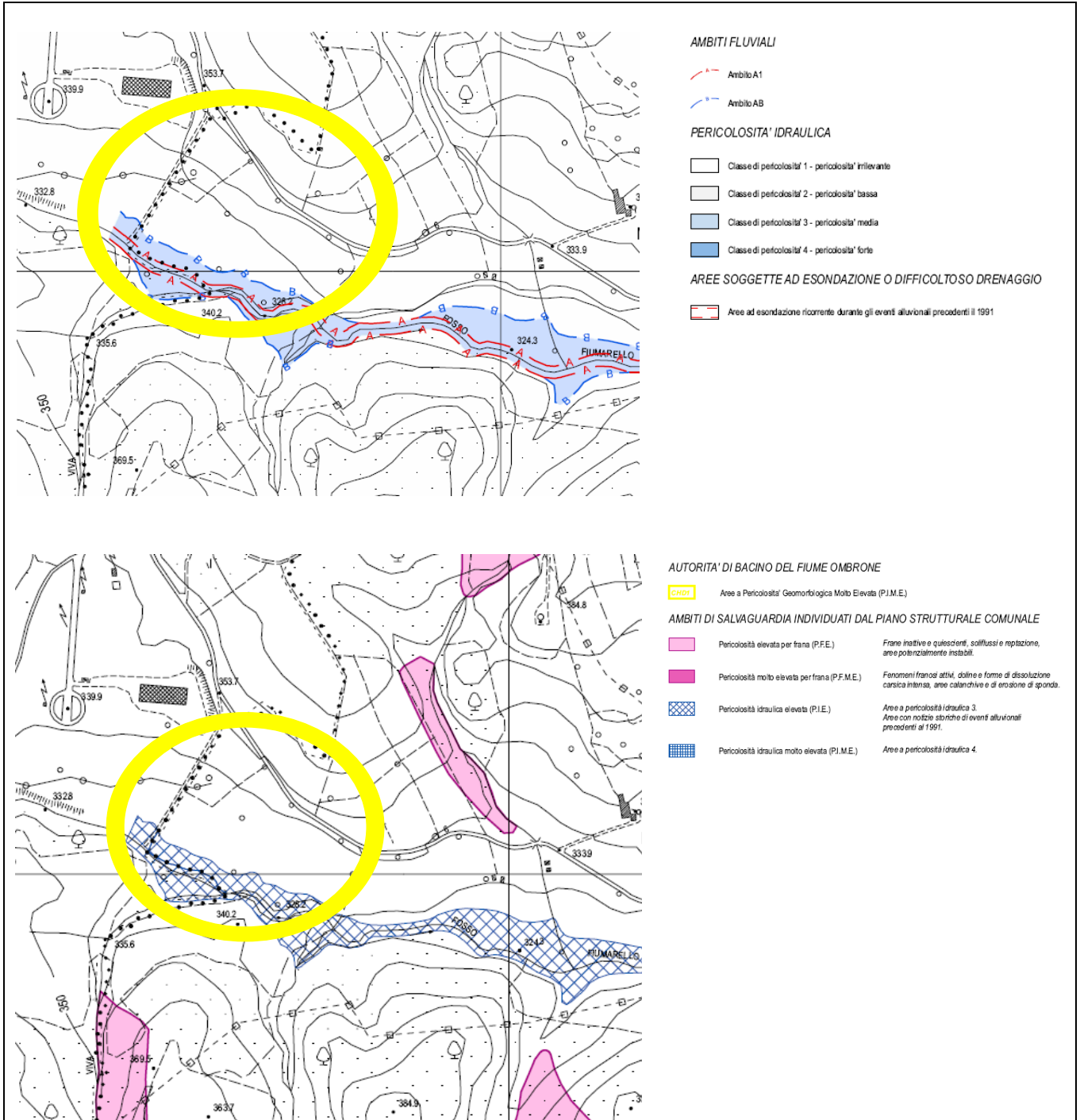


Fig. 3 – Estratti delle Tavv. 3\_10A e 3\_12A del Piano Strutturale per l'area del Fiumarello



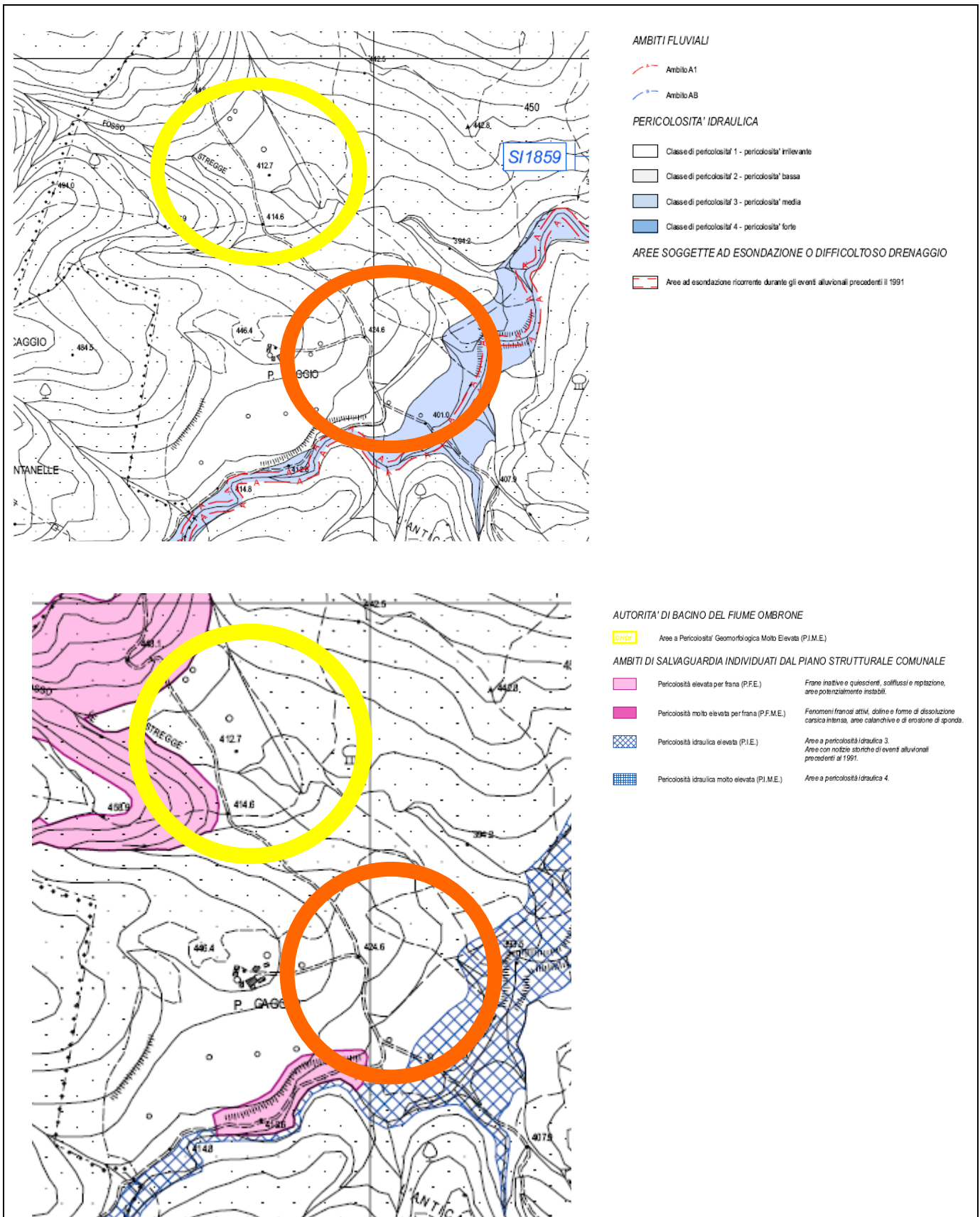


Fig. 4 – Estratti delle Tavv. 3\_10A e 3\_12A del Piano Strutturale per le aree de Le Stregge e del Trisondola

Tutti i corsi d'acqua in oggetto, a parte il Fosso Le Stregge e affluenti, non perimetrati, sono caratterizzati da pericolosità idraulica media, I.3, secondo la classificazione del Piano Strutturale e da pericolosità idraulica elevata, P.I.E., ai sensi del P.A.I. dell'Autorità del Bacino Regionale del Fiume Ombrone.

Da tali elaborati si evince come le aree adiacenti a tali corsi d'acqua siano potenzialmente soggetti ad esondazione, pertanto, con il presente lavoro, si intende valutare mediante apposite modellazioni idrologico-idrauliche le pericolosità idrauliche locali effettive per verificare la fattibilità delle previsioni di Regolamento Urbanistico.

Come anticipato, le verifiche idrologico-idrauliche di seguito descritte sono state condotte sulla base dei disposti del D.P.G.R. 26/R/2007.

### **2.3 Altre aree oggetto di previsione urbanistica**

In aggiunta alle aree finora descritte, vi è un'altra zona che risulta oggetto di previsione, situata in Loc. Pian di Feccia, lungo il Torrente Feccia.

Trattasi dell'area classificata Ed4, Attività estrattiva in territorio aperto, ubicata in prossimità del ponte della S.P. n. 73 sul Torrente Feccia, nell'U.T.O.E. di "Ponte Feccia".

Questa area produttiva esistente, di cui è prevista la riqualificazione, è già stata oggetto di studio idraulico finalizzato all'individuazione della pericolosità idraulica allo stato attuale e alla definizione degli interventi per la messa in sicurezza da realizzarsi contestualmente alle opere di "rifunzionalizzazione" dell'impianto di lavorazione inerti in essa presente.

Tale studio è stato redatto da chi scrive antecedentemente il presente lavoro in più fasi (Marzo-Giugno-Novembre 2011) ed è già stato presentato quale Osservazione al Regolamento Urbanistico nel Novembre 2011.

Esso è stato redatto secondo uno schema del tutto analogo a quello adottato nel presente lavoro, con verifica dei tempi di ritorno pari a 20, 30, 100 e 200 anni per lo stato attuale e ipotesi di messa in sicurezza, già "avallata" dalla Provincia di Siena in sede di richiesta di concessione demaniale, eseguita per il tempo di ritorno duecentennale, pertanto per ogni approfondimento riguardo alla pericolosità idraulica relativa a detta area Ed4 si rimanda integralmente allo studio.

Di seguito si riporta soltanto un estratto della TAv. 6 del Regolamento Urbanistico con l'individuazione dell'area dell'impianto di lavorazione inerti in Loc. Ponte Feccia.

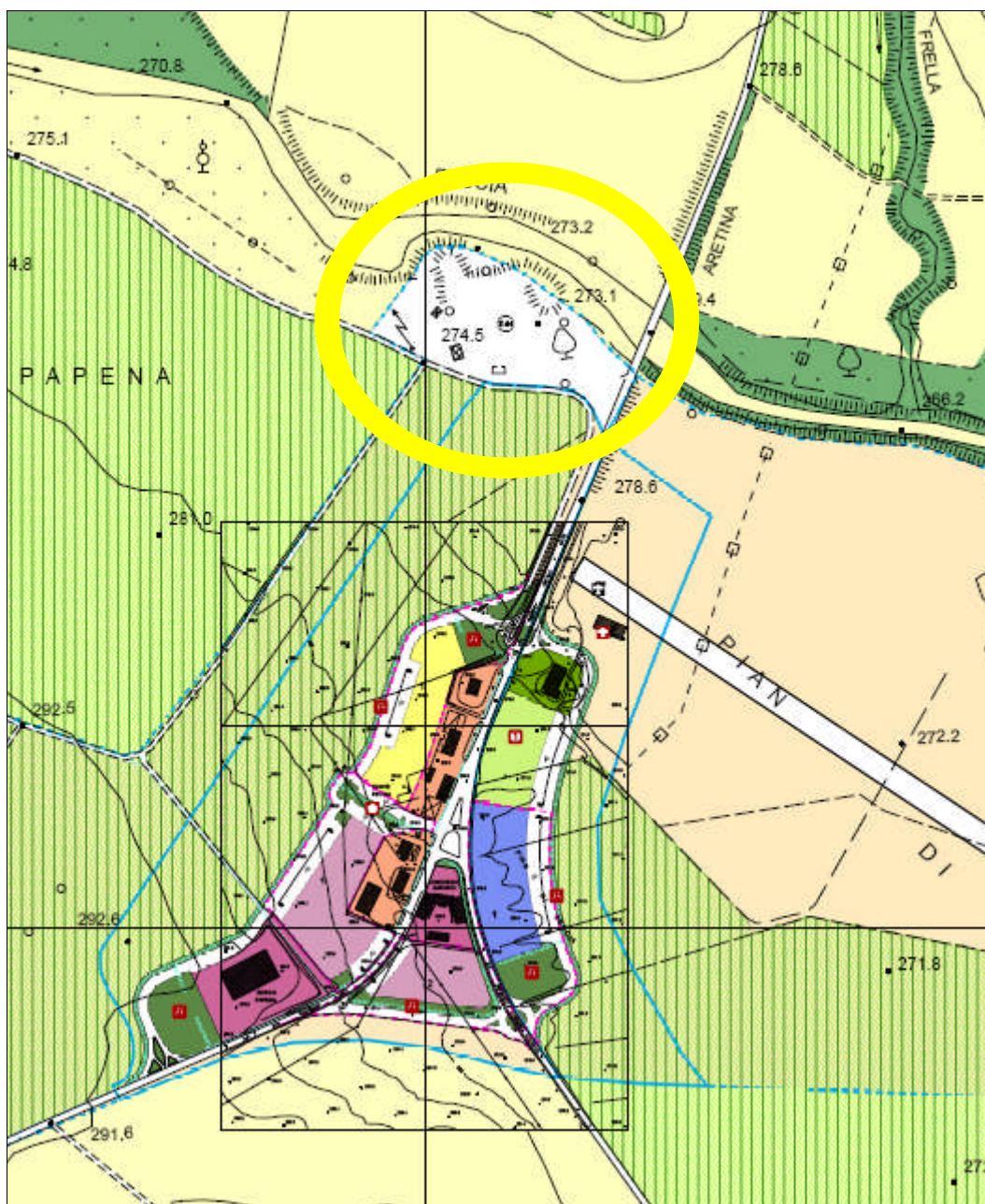


Fig. 5 – Area Ed4 lungo il Torrente Feccia

### 3. MODELLISTICA IDROLOGICA

La modellistica idrologica ha lo scopo di generare, per tutte le sezioni di interesse dei reticoli idrografici studiati, gli idrogrammi di piena per assegnati tempi di ritorno, da cui i relativi valori dei picchi di piena; nel presente lavoro sono stati calcolati gli idrogrammi relativi ad eventi di piena con tempo di ritorno pari a 20, 30, 100 e 200 anni.

Come precedentemente anticipato, ci si è avvalsi dell'ausilio del codice di calcolo AITo 2000 (Regione Toscana, agg. 2007), attraverso il quale è possibile stimare le portate di piena che si possono generare per eventi meteorici intensi, per differenti tempi di ritorno e durate di precipitazione.

Per tutti i corsi d'acqua oggetto di studio sono state valutate le portate sia attraverso la semplice implementazione dei dati della "Regionalizzazione" sia mediante nuove elaborazioni a seguito di un affinamento dei parametri geomorfologici.

Ciò si è reso necessario, date le dimensioni piuttosto esigue dei bacini idrografici studiati, per verificare la presenza di eventuali difformità geomorfologiche, in particolare dello sviluppo dei reticoli e delle superfici dei sottobacini, tra i dati della "Regionalizzazione", valutati sulla base della cartografia IGM e regionale in scala 1:25.000, e quelli ricalcolati sulla C.T.R. 10.000.

La scelta, a meno di divergenze grossolane, è stata quello di adottare nelle verifiche idrauliche i valori di portata maggiori tra le due diverse stime idrologiche, al fine di operare a favore di sicurezza.

#### 3.1 Il codice di calcolo AITo

L'approccio metodologico di AITo si basa sulla trasformazione afflussi-deflussi ottenuta tramite la teoria dell'Idrogramma Istantaneo Unitario o IUH, i cui parametri vengono determinati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del bacino attraverso una procedura di regionalizzazione, ottenendo il cosiddetto Idrogramma Unitario Geomorfológico o GIUH.

L'input meteorico è schematizzato mediante uno "ietogramma sintetico" la cui frequenza viene stimata a partire dalle curve di possibilità pluviometrica ricavate con l'adattamento della distribuzione TCEV (Two Components Extreme Value).

Il modello di trasferimento adottato è quello dell'idrogramma unitario di Nash del tipo  $\Gamma(n, k)$ , dove  $n$  e  $k$  rappresentano rispettivamente i parametri di forma e di scala, e che ha la seguente espressione:

$$U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{(n-1)} e^{-\left(\frac{t}{k}\right)}$$

in cui i parametri  $n$  e  $k$ , i quali hanno le seguenti formulazioni:

$$n = 3.29 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)^{0.78} R_l^{0.07}$$

$$k = 0.7 \left[\frac{R_a}{R_b R_l}\right]^{0.48} \frac{L_c}{v}$$

dipendono a loro volta da  $R_b$ , rapporto di biforcazione,  $R_a$ , rapporto di area,  $R_l$ , rapporto di lunghezza,  $L_c$ , lunghezza del canale principale, e  $v$ , fattore cinematico legato alla velocità della piena; questi ultimi parametri geomorfologici possono essere calcolati sulla base della gerarchizzazione del reticolo idrografico proposta da Horton-Strahler.

In particolare i rapporti di Horton si calcolano secondo le seguenti relazioni:

$$N_u = R_b^{\omega-u}$$

$$\overline{L}_u = \overline{L}_1 R_l^{u-1}$$

$$\overline{A}_u = \overline{A}_1 R_a^{u-1}$$

dove  $\omega$  è l'ordine massimo del reticolo,  $N_u$  il numero delle aste di ordine  $u$  ( $u=1, 2, 3\dots$ ),  $\overline{L}_u$  la lunghezza media delle aste di ordine  $u$  e  $\overline{A}_u$  l'area media sottesa da aste di ordine  $u$ .

La "Regionalizzazione" fornisce un legame tra il tempo di ritardo  $T_l$  e i parametri di geomorfologici attraverso la relazione:

$$T_l = 0.42 \left( R_b / R_a \right)^{0.3} R_l^{-0.41} \frac{L_{mc}}{A^{0.075}}$$

in cui  $L_{mc}$  rappresenta la lunghezza media complessiva del reticolo [km] ed  $A$  l'area del bacino [kmq].

La valutazione del contributo netto di pioggia alla formazione del deflusso sul reticolo necessita della stima di ulteriori due parametri che tengano conto delle perdite di infiltrazione; si tratta dell'assorbimento completo della precipitazione durante le prime fasi dell'evento meteorico,  $I_a$  [mm], e dell'infiltrazione costante a saturazione,  $K_s$  [mm/h].

Il legame tra questi due parametri è il seguente:

$$I_a(t) = I_a(0) + \int_0^{t_a} (P(\tau) - K_s) d\tau$$

dove, per  $t < t_a$  abbiamo  $P_n(t) = 0$  e  $I_a(t) = I_a$

e per  $t \geq t_a$  abbiamo  $P_n(t) = P(t) - K_s$

Su questa procedura poggiano le elaborazioni del codice AITo, e grazie ad essa è stato possibile stimare preliminarmente le portate di piena ventennale, trentennale, centennale e duecentennale per i vari corsi d'acqua in esame in condizioni di durata di precipitazione variabile (critica) e fissa.

### 3.2 Stima delle portate Fosso Fiumarello

Come anticipato, dapprima è stato implementato il calcolo idrologico con i parametri geomorfologici e pluviometrici proposti da AITo.

E' stato scelto di eseguire il calcolo a favore di sicurezza, ovvero sulla sezione idraulica posta a valle dell'area oggetto di intervento; le portate risultanti considerano quindi già i contributi di tutti gli affluenti laterali che si immettono nel Fiumarello a monte di questa sezione.

Il file \*.idr dei parametri, così come disponibile su AITo, è il seguente:

Corso d'acqua	Area [kmq]	la [mm]	Ks [mm/h]	n	K [h]	a1	n1	m1	a	n	m
Fosso Fiumarello	3.520	17.600	0.232	1.763	0.317	25.045	0.329	0.15	23.832	0.346	0.192

Tab. 1: Parametri idrologici e geomorfologici originali di AITo relativi alla sezione idraulica di valle del Fosso Fiumarello

Nella seguente Tab. 2 sono mostrati i picchi di portata risultanti da questa elaborazione nei diversi scenari di riferimento, calcolati per durate di precipitazione predefinite.

Durata di precipitazione [min]	Q200 [mc/s]	Q100 [mc/s]	Q30 [mc/s]	Q20 [mc/s]
30	41.603	34.289	23.546	20.407
60	47.805	40.669	30.125	27.012
90	44.430	38.417	29.553	26.942
120	39.164	34.102	26.694	24.533

Tab. 2 – Picchi di portata per eventi con differenti tempi di ritorno, calcolati per durate di precipitazioni predefinite, in seguito ad elaborazione dei parametri originali di AITo

Dalla precedente tabella si osserva come la durata di precipitazione che massimizza la portata (durata critica) per il corso d'acqua sia pari a circa 60 minuti.

Allo scopo di eseguire tali valutazioni con un dovuto approccio cautelativo, è stata anche condotta una revisione dei parametri geomorfologici del bacino del Fosso Fiumarello al fine di confrontare i valori proposti da AITo con nuovi parametri basati sui dati della C.T.R. in scala 1:10.000.

Non sono stati modificati i parametri delle curve di possibilità pluviometrica per via delle ridotte dimensioni dei bacini che ricadono per intero sulla superficie di "influenza" di singole stazioni pluviometriche.

Innanzitutto la superficie del bacino è stata ridefinita sulla cartografia regionale, risultando, nella sezione di valle, pari a circa 3.488 kmq (paragonabile con quella di AITo).

Inoltre è stata ripermetrata l'area coperta da superficie boscata utilizzando i dati propri della C.T.R. 1:10.000 (layer 702 e 714), piuttosto che il raster 400x400 m di AITo.

Ciò ha consentito di ottenere un nuovo valore del parametro  $I_a$  di intercettazione iniziale; esso è stato calcolato adottando la medesima formula di calcolo di AITo, ovvero:

$$I_a = 3.3 + 22 \cdot (\% Sup.boscata)$$

La superficie boscata sul bacino del Fosso Fiumarello è risultata pari a circa il 57% della superficie totale, da cui un valore di  $I_a$  pari a 15.809 mm.

E' stata, infine, eseguita una nuova gerarchizzazione del reticolo idrografico al fine di ricalcolare i parametri  $n$  e  $k$ , che, come citato in precedenza, dipendono direttamente dai rapporti  $R_a$ ,  $R_b$  e  $R_l$  di Horton.

In tal senso è stato nuovamente assegnato l'ordine a ciascuna asta fluviale, secondo il reticolo idrografico della C.T.R. 1:10.000, valutata la lunghezza di ogni tronco e quella totale di ciascun ordine, e, allo stesso modo, calcolata la superficie del sottobacino di incidenza di ciascun tronco e quella totale di ciascun ordine.

Nella figura successiva è mostrata la gerarchizzazione del reticolo del Fosso Fiumarello.

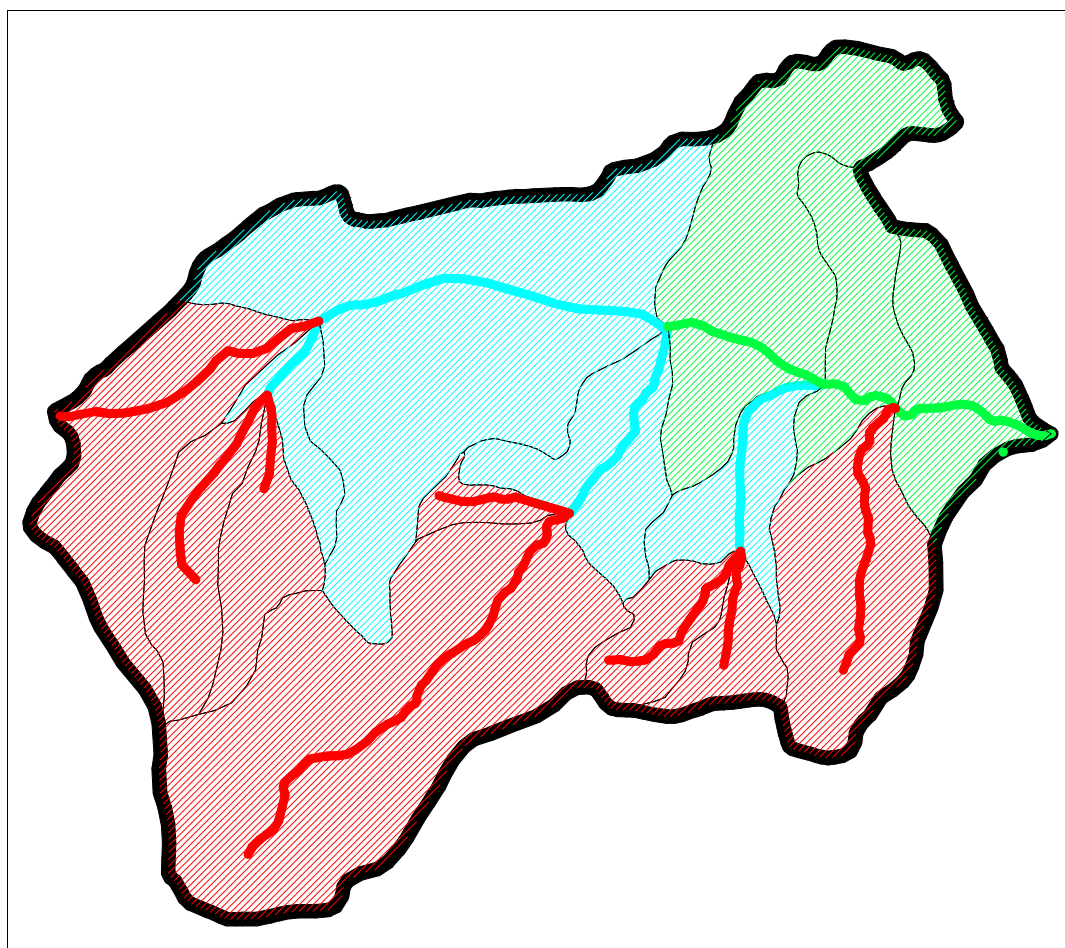


Fig. 6 – Gerarchizzazione del reticolo idrografico del Fosso Fiumarello e aree dei sottobacini: colore rosso = 1° ordine, colore azzurro = 2° ordine, colore verde = 3° ordine

Alla luce di questa nuova gerarchizzazione e conseguente stima dei rapporti di Horton, le formule precedentemente citate di  $n$  e  $k$  (quest'ultimo valutato come rapporto tra  $T_l$  ed  $n$ ) restituiscono, rispettivamente, i valori di 2.435 e 0.243 [h].

Pertanto il nuovo file dei parametri idrologici e geomorfologici da elaborare con ALTO per l'ottenimento delle portate di picco risulta il seguente:

Corso d'acqua	Area [kmq]	la [mm]	Ks [mm/h]	n	K [h]	a1	n1	m1	a	n	m
Fosso Fiumarello	3.488	15.809	0.232	2.435	0.243	25.045	0.329	0.15	23.832	0.346	0.192

Tab. 3: Parametri idrologici e geomorfologici modificati relativi alla sezione idraulica di valle del Fosso Fiumarello

Nella seguente tabella sono quindi mostrati i picchi di portata risultanti da questa nuova elaborazione, nei diversi scenari di riferimento e calcolati per le medesime durate di precipitazione considerate in precedenza.

Durata di precipitazione [min]	Q200 [mc/s]	Q100 [mc/s]	Q30 [mc/s]	Q20 [mc/s]
30	43.048	35.793	25.168	22.071
60	48.877	41.756	31.270	28.187
90	44.949	38.963	30.159	27.582
120	39.220	34.203	26.887	24.762

Tab. 4 – Picchi di portata per eventi con differenti tempi di ritorno, calcolati per durate di precipitazioni predefinite, in seguito ad elaborazione dei parametri modificati di ALTO

Si può notare come i valori di portata risultino sostanzialmente equivalenti a quello proposti originalmente da ALTO, ed anche la durata critica di precipitazione resta invariata (circa D=60 minuti).

Nella seguente tabella sono messi a confronto i valori di portata per precipitazione critica tra l'elaborazione originale di ALTO e quella risultante dai parametri modificati.

Scenario	Q200 [mc/s]	Q100 [mc/s]	Q30 [mc/s]	Q20 [mc/s]
ALTO originale	47.805	40.669	30.125	27.012
Alto modificato	48.877	41.756	31.270	28.187

Tab. 5 – Confronto tra i picchi di portata calcolati con i parametri della "Regionalizzazione" e con i parametri rivalutati, per durata di precipitazione critica (D=60 minuti)

A favore di sicurezza, nelle modellazioni idrauliche di cui al successivo capitolo, sono adottate le portate derivanti dalla nuova analisi idrologica, ovvero quelle campite in giallo nella precedente Tab. 5.



### 3.3 Stima delle portate Fosso Le Stregge e affluenti

Per quanto riguarda il Fosso Le Stregge ed i suoi Affluenti Destro e Sinistro si è verificata una sostanziale corrispondenza tra il reticolo di AITo e quello della cartografia regionale, pertanto si è scelto di non procedere, come nel caso del Fosso Fiumarello, ad una nuova gerarchizzazione del reticolo.

La seguente tabella mostra i file \*.idr dei parametri, così come disponibili su AITo, valutati per Le Stregge nella sezione posta a valle della confluenza con l'Affluente Destro mentre per gli affluenti nelle sezioni di confluenza con Le Stregge stesso.

Corso d'acqua	Area [kmq]	la [mm]	Ks [mm/h]	n	K [h]	a1	n1	m1	a	n	m
Fosso Le Stregge	1.200	22.550	3.584	2.649	0.119	25.045	0.329	0.15	23.832	0.346	0.192
Affluente Sinistro	0.704	25.300	2.906	3.293	0.01	25.045	0.329	0.15	23.832	0.346	0.192
Affluente Destro	0.528	25.300	3.875	3.974	0.01	25.045	0.329	0.15	23.832	0.346	0.192

Tab. 6: Parametri idrologici e geomorfologici originali di AITo del Fosso Le Stregge e degli Affluenti Sinistro e Destro

Sono state però verificate le superfici dei bacini dei 3 corsi d'acqua in quanto si è osservata una difformità grossolana tra le aree di AITo e quelle effettive tracciate sulla C.T.R. 1:10.000.

Le superfici dei bacini sono risultate essere pari a 0.439 kmq per il Fosso Le Stregge, 0.118 kmq per l'Affluente Sinistro e 0.208 kmq per l'Affluente Destro.

Data la notevole divergenza con le precedenti aree, si è scelto di adottare le aree ridefinite, risultando così il file \*.idr dei parametri di calcolo il seguente:

Corso d'acqua	Area [kmq]	la [mm]	Ks [mm/h]	n	K [h]	a1	n1	m1	a	n	m
Fosso Le Stregge	0.439	22.550	3.584	2.649	0.119	25.045	0.329	0.15	23.832	0.346	0.192
Affluente Sinistro	0.118	25.300	2.906	3.293	0.01	25.045	0.329	0.15	23.832	0.346	0.192
Affluente Destro	0.208	25.300	3.875	3.974	0.01	25.045	0.329	0.15	23.832	0.346	0.192

Tab. 7: Parametri idrologici e geomorfologici originali di AITo con aree modificate ( in giallo) del Fosso Le Stregge e degli Affluenti Sinistro e Destro

Questa scelta trova conferma anche nello studio idrologico-idraulico redatto a supporto del progetto di realizzazione della centrale geotermoelettrica "Chiusdino 1" di Enel Green Power (2007); nella seguente figura è mostrata un estratto della relazione idrologico-idraulica in cui sono rappresentati i 3 bacini, con superfici all'incirca equivalente a quelle valutate nel presente lavoro.

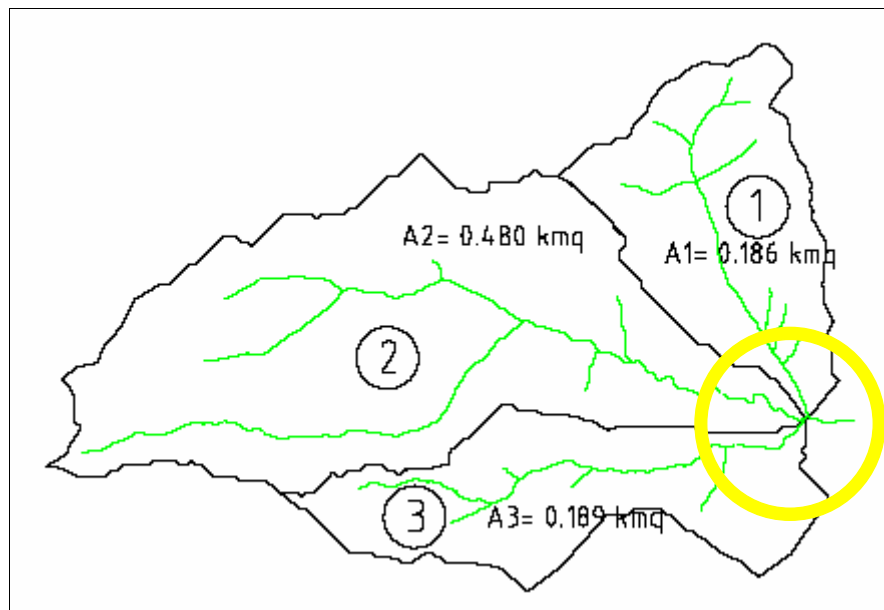


Fig. 7 – Estratto dello studio idraulico a supporto della progettazione della centrale Enel

Sono stati perciò elaborati mediante AITo i precedenti file parametrici fino ad ottenere i valori di picco delle portate di piena nei diversi scenari di riferimento, calcolati per durate di precipitazione predefinite. Tali portate sono mostrate nella seguente Tab. 8

Durata di precipitazione [min]	Q200 [mc/s]	Q100 [mc/s]	Q30 [mc/s]	Q20 [mc/s]
<b>FOSSO LE STREGGE</b>				
15	5.482	4.012	1.845	1.209
30	7.588	6.041	3.682	2.961
45	7.810	6.484	4.417	3.759
60	7.194	6.118	4.449	3.922
75	6.415	5.520	4.166	3.745
<b>AFFLUENTE SINISTRO</b>				
15	5.226	4.353	2.078	0.976
30	3.323	2.897	2.280	2.100
45	2.528	2.201	1.728	1.592
60	2.078	1.808	1.416	1.303
75	1.784	1.550	1.211	1.114
<b>AFFLUENTE DESTRO</b>				
15	8.966	7.543	3.610	1.337
30	5.755	5.011	3.931	3.606
45	4.365	3.795	2.968	2.730
60	3.580	3.108	2.422	2.225
75	3.065	2.657	2.065	1.894

Tab. 8 – Picchi di portata per eventi con differenti tempi di ritorno, calcolati per durate di precipitazioni predefinite, in seguito ad elaborazione dei parametri originali di AITo con aree di bacino modificate, per il Fosso Le Stregge ed i suoi Affluenti Sinistro e Destro

Dalla Tab. 8 si nota che le durate di precipitazione che massimizzano gli eventi di piena sono diverse per i 3 corsi d'acqua.

Il bacino del Fosso Le Stregge, avendo superficie maggiore, va in crisi, alle sezione idraulica di riferimento, per durate di pioggia maggiori (circa 45 minuti), a differenza dei bacini degli affluenti che determinano il picco in occasione di precipitazioni intense di breve durata (circa 15 minuti).

Considerando che nella modellazione idraulica di questi corsi d'acqua è stato scelto di realizzare un unico modello congiunto delle 3 aste, gli scenari idrologici valutati sono quelli corrispondenti alle durate di pioggia predefinite, in cui, in un caso, tenderanno a massimizzare Le Stregge, e nell'altro, i suoi Affluenti.

Le conseguenti aree allagate tracciate terranno conto delle condizioni maggiormente critiche per ciascun corso d'acqua.

### 3.4 Stima delle portate Torrente Trisondola

Per il Torrente Trisondola è stata eseguita un'analisi idrologica analoga a quella del Fosso Fiumarello, con preliminare elaborazione dei dati originali di AITo e successivo confronto con le elaborazioni dei dati geomorfologici ricalcolati secondo lo schema precedentemente descritto.

Anche in questo caso la sezione idraulica di calcolo è quella immediatamente a valle dell'area D2p oggetto di previsione lungo il Torrente Trisondola.

Pertanto dapprima sono mostrate la tabella dei parametri originali di AITo e la tabella delle portate di picco derivanti dalle elaborazioni di questi dati.

Corso d'acqua	Area [kmq]	la [mm]	Ks [mm/h]	n	K [h]	a1	n1	m1	a	n	m
Torrente Trisondola	5.280	20.167	3.772	2.732	0.252	25.045	0.329	0.15	23.832	0.346	0.192

Tab. 9: Parametri idrologici e geomorfologici originali di AITo relativi alla sezione idraulica di valle del Torrente Trisondola

Durata di precipitazione [min]	Q200 [mc/s]	Q100 [mc/s]	Q30 [mc/s]	Q20 [mc/s]
30	49.727	39.753	25.123	20.865
60	60.852	50.434	34.906	30.287
90	59.175	50.053	36.377	32.271
120	53.018	45.346	33.927	30.508

Tab. 10 – Picchi di portata per eventi con differenti tempi di ritorno, calcolati per durate di precipitazioni predefinite, in seguito ad elaborazione dei parametri originali di AITo

Dalla precedente Tab. 10 si osserva come la durata di precipitazione che massimizza la portata (durata critica) per il corso d'acqua sia pari a circa 60 minuti.

Successivamente si è passati, come per il bacino del Fosso Fiumarello, alla revisione dei parametri geomorfologici del bacino del Torrente Trisondola insistente sulla sezione idraulica posta a valle dell'area oggetto di studio, in modo da poterli confrontare con i valori proposti da AITo

Anche in questo caso non sono stati modificati i parametri delle curve di possibilità pluviometrica.

La superficie del bacino è stata ridefinita sulla cartografia regionale, risultando, nella sezione di valle, pari a circa 4.311 kmq (quasi 1 kmq inferiore rispetto a quella proposta dalla "Regionalizzazione").

E' stata ripermetrata l'area coperta da superficie boscata utilizzando i dati propri della C.T.R. 1:10.000 (layer 702 e 714).

Il nuovo valore del parametro  $I_a$  di intercettazione iniziale, calcolato con la medesima formula di cui sopra, è risultato essere pari a 20.900 mm, in funzione di una copertura boscata pari a circa l'80% della superficie complessiva del bacino.

E' stata, infine, eseguita la nuova gerarchizzazione del reticolo idrografico secondo Horton-Strahler. Nella figura successiva è mostrata la nuova gerarchizzazione del reticolo del Torrente Trisondola.

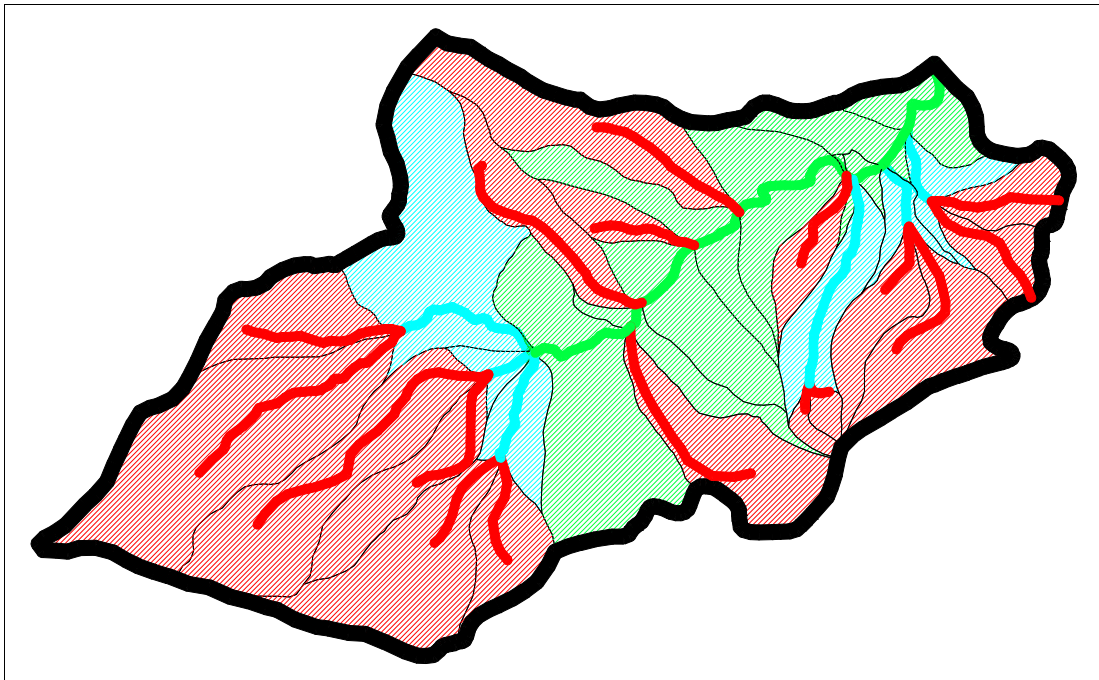


Fig. 8 – Gerarchizzazione del reticolo idrografico del Torrente Trisondola e aree dei sottobacini: colore rosso = 1° ordine, colore azzurro = 2° ordine, colore verde = 3° ordine

Alla luce della nuova gerarchizzazione e conseguente stima dei rapporti di Horton, le formule precedentemente citate di  $n$  e  $k$  (quest'ultimo valutato come rapporto tra  $T_i$  ed  $n$ ) restituiscono, rispettivamente, i valori di 2.592 e 0.183 [h].

Pertanto il nuovo file dei parametri idrologici e geomorfologici da elaborare con ALTO per l'ottenimento delle portate di picco risulta il seguente:

Corso d'acqua	Area [kmq]	la [mm]	Ks [mm/h]	n	K [h]	a1	n1	m1	a	n	m
Torrente Trisondola	4.311	20.900	3.772	2.592	0.183	25.045	0.329	0.15	23.832	0.346	0.192

Tab. 11: Parametri idrologici e geomorfologici modificati relativi alla sezione idraulica di valle del Torrente Trisondola

Nella seguente tabella sono quindi mostrati i picchi di portata risultanti da questa nuova elaborazione, nei diversi scenari di riferimento e calcolati per le medesime durate di precipitazione considerate in precedenza.

Durata di precipitazione [min]	Q200 [mc/s]	Q100 [mc/s]	Q30 [mc/s]	Q20 [mc/s]
30	55.140	44.098	27.706	22.877
60	60.962	51.114	36.152	31.603
90	53.392	45.730	34.234	30.744
120	45.010	38.789	29.637	26.933

Tab. 12 – Picchi di portata per eventi con differenti tempi di ritorno, calcolati per durate di precipitazioni predefinite, in seguito ad elaborazione dei parametri modificati di AITo

Anche in questo caso i valori di portata risulta pressoché equivalenti a quello proposti originalmente da AITo, ed anche la durata critica di precipitazione resta invariata (circa D=60 minuti).

Nella seguente tabella sono messi a confronto i valori di portata per precipitazione critica tra l'elaborazione originale di AITo e quella risultante dai parametri modificati.

Scenario	Q200 [mc/s]	Q100 [mc/s]	Q30 [mc/s]	Q20 [mc/s]
AITo originale	60.852	50.434	34.906	30.287
Alto modificato	60.962	51.114	36.152	31.603

Tab. 13 – Confronto tra i picchi di portata calcolati con i parametri della “Regionalizzazione” e con i parametri rivalutati, per durata di precipitazione critica (D=60 minuti)

A favore di sicurezza, e per uniformità con le scelte adottate in precedenza per il Fosso Fiumarello e il Fosso Le Stregge, nelle modellazioni idrauliche sono utilizzate le portate derivanti dalla nuova analisi idrologica, ovvero quelle campite in giallo nella precedente Tab. 13.

## 4. MODELLISTICA IDRAULICA

La modellistica idraulica adottata nel presente lavoro si basa su un approccio metodologico condiviso e di diffuso impiego.

I modelli idraulici del Fosso Fiumarello, del Fosso Le Stregge e Affluenti e del Torrente Trisondola lungo i tratti di interesse sono stati realizzati in moto permanente, il cui schema operativo viene di seguito descritto.

Nei paragrafi che seguono sono state approfondite le tematiche legate al moto permanente, affrontate dal punto di vista della struttura operativa del codice di calcolo Hec-Ras, versione 4.1.0, utilizzato per la modellazione, e illustrati i singoli modelli idraulici.

### 4.1 *Approccio metodologico*

La modellazione idraulica realizzata nel presente lavoro si basa, innanzitutto, sulla rappresentazione schematizzata del tratto fluviale in questione attraverso l'acquisizione di sezioni idrauliche effettivamente rilevate sul territorio.

Tali sezioni, poste a distanza ragionevole l'una dall'altra, consentono di riprodurre in modo affidabile l'andamento del corso d'acqua e la configurazione degli elementi trasversali (briglie, traverse, ponti) e longitudinali (argini) presenti.

Il grado di accuratezza del modello dipende inevitabilmente dal livello di discretizzazione spaziale adottato.

La descrizione geometrica dei corsi d'acqua in esame è completata mediante l'assegnazione delle caratteristiche di scabrezza dell'alveo e delle aree adiacenti in base alle reali condizioni osservate in situ e ai materiali utilizzati per le opere costruite.

Ciascun modello impone, quindi, di specificare i parametri e le grandezze idrauliche che definiscono l'evento di piena da analizzare; sono pertanto assegnate le portate in ingresso e le condizioni al contorno necessarie per l'elaborazione numerica.

L'esito del calcolo conduce all'individuazione, sezione per sezione, delle variabili idrauliche coinvolte (portate, livelli idrometrici) e dell'intero profilo della corrente; sulla base di queste indicazioni risulta così possibile determinare le condizioni di criticità ed eventualmente definire le soluzioni per ridurle o eliminarle.

Tale procedura, sinteticamente riassunta, è stata applicata mediante l'uso del codice di calcolo HEC-RAS 4.1.0.

### 4.2 *Il codice di calcolo HEC-RAS 4.1.0*

Il software HEC-RAS permette di calcolare il profilo idraulico di una corrente in condizioni di moto permanente gradualmente variato in regime subcritico, supercritico o misto per una rete di canali, un sistema dendritico o un singolo ramo fluviale.

La procedura di calcolo si basa sulla soluzione dell'equazione monodimensionale dell'energia. Le perdite distribuite di energia sono valutate attraverso l'equazione di Manning, quelle concentrate attraverso la definizione di opportuni coefficienti di contrazione e espansione della corrente.

Nell'analisi in moto permanente è possibile tenere conto della presenza lungo il corso d'acqua di eventuali ostacoli o manufatti che ostruiscono o solamente alterano il regolare deflusso, come ponti o briglie.

Le basi teoriche adottate dal codice di calcolo HEC-RAS per l'analisi in moto permanente sono di seguito esposte.

Il profilo dei livelli idrici è valutato tra due sezioni successive risolvendo l'equazione dell'energia attraverso un metodo a passo standard ("step standard method"); si fa riferimento, in pratica, all'equazione di Bernoulli estesa alle correnti nella forma:

$$Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_e$$

in cui:  $Y_1, Y_2$  = livello idrico (altezza d'acqua) nella sezione, [m]

$Z_1, Z_2$  = quota altimetrica del fondo della sezione, [m]

$V_1, V_2$  = velocità media della corrente, [m/s]

$\alpha_1, \alpha_2$  = coefficienti di raggugli della velocità

$g$  = accelerazione di gravità, [m/s<sup>2</sup>]

$h_e$  = perdita di carico, [m].

Le perdite di carico sono determinate dal contributo delle perdite per attrito e di quelle per espansione/contrazione tra due sezioni fluviali successive. Queste perdite sono valutate in base alla seguente formula:

$$h_e = L \bar{S}_f + C \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}$$

dove:  $L$  = media pesata della distanza tra le due sezioni,  
pesata tra la distanza dell'alveo inciso e delle golene, [m]

$\bar{S}_f$  = pendenza di attrito rappresentativa tra le due sezioni

$C$  = coefficiente di perdita per espansione/contrazione.

La determinazione della portata complessiva e della velocità di trasferimento è condotta mediante la risoluzione dell'equazione di Manning secondo la seguente forma:

$$Q = \frac{1,486}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2}$$

dove:  $n$  = coefficiente di attrito di Manning, [s/m<sup>3/2</sup>]

$A$  = superficie bagnata, [m<sup>2</sup>]

$R$  = raggio idraulico, [m].

Ciascuna sezione viene suddivisa in parti di a scabrezza differente, generalmente maggiore nelle fasce golenali ed inferiore nell'alveo attivo.

Nei casi in esame i corsi d'acqua di distinguono per una scabrezza d'alveo molto marcata, spesso omogenea tra alveo attivo e fasce laterali; nelle sezioni idrauliche mostrate in allegato sono riportate le singole fasce di scabrezza, sezione per sezione.

Una volta risolta l'equazione di Manning per il numero di fasce di scabrezza che sono state individuate, il programma somma semplicemente i vari contributi ed ottiene la portata totale su ciascuna sezione.

Le perdite per attrito vengono individuate dal prodotto tra  $\bar{S}_f$  ed  $L$ . La formula utilizzata di default da HEC-RAS nel calcolo di  $\bar{S}_f$  è la seguente:



$$\bar{S}_f = \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2}^2$$

$$\text{in cui } K_1, K_2 = \frac{1,486}{n} AR^{\frac{2}{3}}, [\text{m}^3/\text{s}].$$

Ogni volta che la corrente passa attraverso l'altezza critica l'equazione dell'energia non può più considerarsi applicabile, essendo essa valida soltanto per correnti gradualmente variate; lungo un corso d'acqua esistono molte possibilità che la corrente passi da subcritica a supercritica o viceversa, per esempio in corrispondenza di un ponte o di un salto idraulico. HEC-RAS si avvale dell'equazione della quantità di moto per risolvere puntualmente queste situazioni critiche.

La forma dell'equazione utilizzata dal software è la seguente:

$$\frac{Q_2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \frac{A_1 + A_2}{2} L S_0 - \frac{A_1 + A_2}{2} L \bar{S}_f = \frac{Q_1 \beta_1}{g A_1} + A_1 \bar{Y}_1$$

nella quale:  $\beta_1, \beta_2$  = coefficienti di ragguglio della velocità per canali irregolari

$S_0$  = pendenza dell'alveo

$\bar{Y}_1, \bar{Y}_2$  = altezza d'acqua rispetto al baricentro della sezione, [m].

Nel caso del presente lavoro tutte le modellazioni sono state condotte in regime di corrente mista.

### 4.3 Modello idraulico Fosso Fiumarello

Il modello idraulico del Fosso Fiumarello è costituito da un'unica asta principale descritta mediante l'acquisizione di 11 sezioni fluviali rilevate ad hoc per il presente lavoro.

Sono state rilevate sezioni soltanto laddove vi è stata possibilità di accedere all'alveo, data l'assai fitta vegetazione infestante presente, e comunque esse risultano in numero sufficiente per descrivere adeguatamente l'andamento del corso d'acqua.

Complessivamente il tratto fluviale esaminato risulta pari a circa 780 m.

Lungo questo tratto, che parte da monte dell'attraversamento sulla strada vicinale che porta alla centrale geotermica, nel Comune di Radicondoli, fino a valle dell'are D2p del Comune di Chiusdino oggetto di previsione, si riscontra la presenza di un solo attraversamento (quello posto monte).

Il motivo della scelta di condurre una modellazione in moto permanente è dovuto alla particolare conformazione del corso d'acqua lungo il tratto in esame; infatti il corso d'acqua, in questo tratto, non è praticamente arginato (solo un breve tratto in sinistra idraulica nel Comune di Radicondoli) e le aree ad esso adiacenti presentano quote altimetriche più elevate. Su entrambi i lati il terreno degrada verso il corso d'acqua con acclività variabili (maggiore in destra idraulica), perciò non si manifesta l'esigenza di modellare le aree laterali come aree di accumulo e laminazione, bensì, come anticipato nella parte introduttiva, è apparso più ragionevole modellare il sistema come un unico "macro-alveo" con comportamento dinamico di trasferimento di volumi di piena verso valle, senza effetti di laminazione per accumulo statico.

Questa caratteristica morfologica accomuna tutti i corsi d'acqua studiati nel presente lavoro.

Al corso d'acqua, a causa dell'elevata scabrezza dell'alveo, sono stati assegnati valori del coefficienti  $n$  di Manning piuttosto importanti, variabili tra 0.035 sm-1/3 fino a 0.065 sm-1/3.

La seguente tabella riassume le caratteristiche fisiche del modello idraulico.

<i>Corso d'acqua</i>	FOSSO FIUMARELLO	
<i>Modellazione</i>	MOTO PERMANENTE	
<i>Lunghezza totale tratto studiato</i>	[m]	779,81
<i>Sezioni idrauliche "River Station"</i>	[n°]	11
<i>Ponti ("Bridge")</i>	[n°]	1
<i>Traverse ("Inline Structure")</i>	[n°]	0
<i>Scabrezza (coefficiente n di Manning)</i>	[s/m <sup>3</sup> ]	0.035-0.065

Tab. 14 – Caratteristiche geometriche del modello idraulico del Fosso Fiumarello

Come già anticipato nel Cap. 3, l'intera analisi idrologica è stata sviluppata con l'intento di definire gli input idrologici da fornire al modello idraulico di cui al presente capitolo.

Essi corrispondono ai valori dei picchi di portata precedentemente calcolati, per eventi pari a 20, 30, 100 e 200 e relativi a varie durate di precipitazione (Tab. 4).

Come condizioni al contorno sono state adottate le pendenze di moto uniforme, pari a 0.018 e 0.011 rispettivamente a monte e valle.

Nella seguente Fig. 9 è rappresentato lo schema geometrico del modello di Hec-Ras del Fosso Fiumarello.

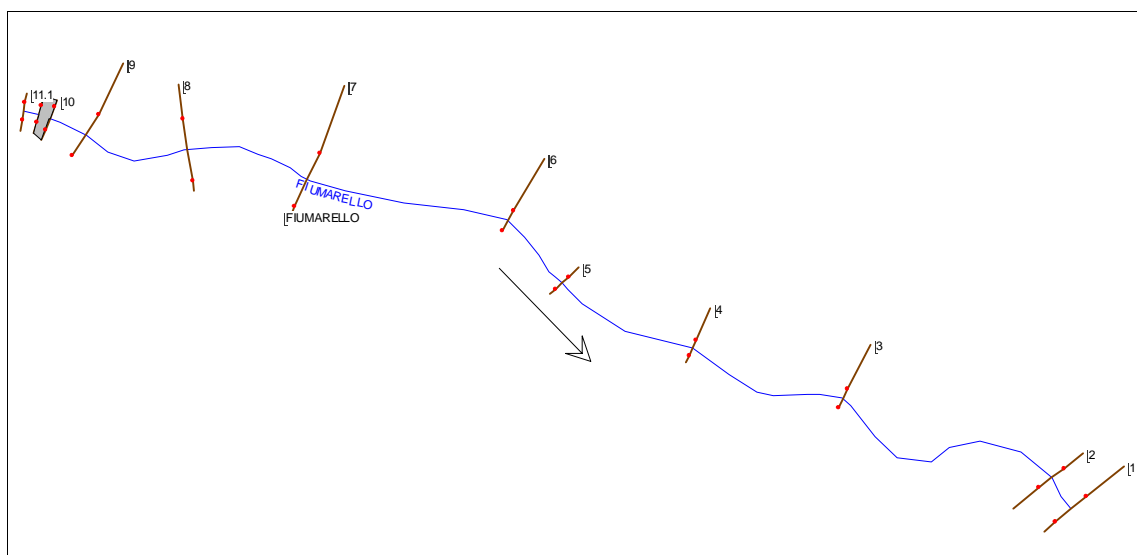


Fig. 9 – Modello geometrico Fosso Fiumarello

#### **4.4 Modello idraulico Fosso Le Stregge e affluenti**

Per il Fosso Le Stregge ed i suoi Affluenti Sinistro e Destro è stato realizzato un modello congiunto volto a ricostruire le interazioni reciproche dei 3 corsi d'acqua in prossimità dell'area D1p della centrale geotermica di "Chiusdino 1".

Per la rappresentazione dei corsi d'acqua sono state utilizzate alcune sezioni idrauliche rilevate ad hoc, in particolare riguardanti i tratti de Le Stregge e Affluente Destro a monte della centrale ed in generale i tratti con presenza di manufatti.

Sono state rilevate sezioni soltanto laddove vi è stata possibilità di accedere all'alveo, data l'assai fitta vegetazione infestante presente, e comunque esse risultano in numero sufficiente per descrivere adeguatamente l'andamento dei corsi d'acqua.

Inoltre si è voluto integrare la rappresentazione dei corsi d'acqua mediante ulteriori sezioni idrauliche estratte dallo studio idraulico redatto a supporto della progettazione della centrale Enel stessa (2007).

Di queste ultime sezioni sono state utilizzate esclusivamente quelle non ricadenti sull'area di centrale, in quanto antecedenti la sua realizzazione.

Nella seguente figura è mostrata la tavola delle aree allagate ante realizzazione della centrale geotermica in cui sono riportate anche le sezioni rilevate a suo tempo.

In particolare le sezioni ricavate da detto studio sono le seguenti:

- Fosso Le Stregge: CE14
- Affluente Destro: DX6, DX7, DX8
- Affluente Sinistro: SX1, SX2, SX3, SX4, SX5

Di tali sezioni è stata verificata la congruità rispetto allo stato attuale.

Tali sezioni sono state rinumerate insieme a quelle di nuova rilevazione; nella TAV. 2a allegata al presente lavoro sono mostrate le sezioni complessivamente utilizzate per la rappresentazione del corso d'acqua, ma distinte per fonte di provenienza.

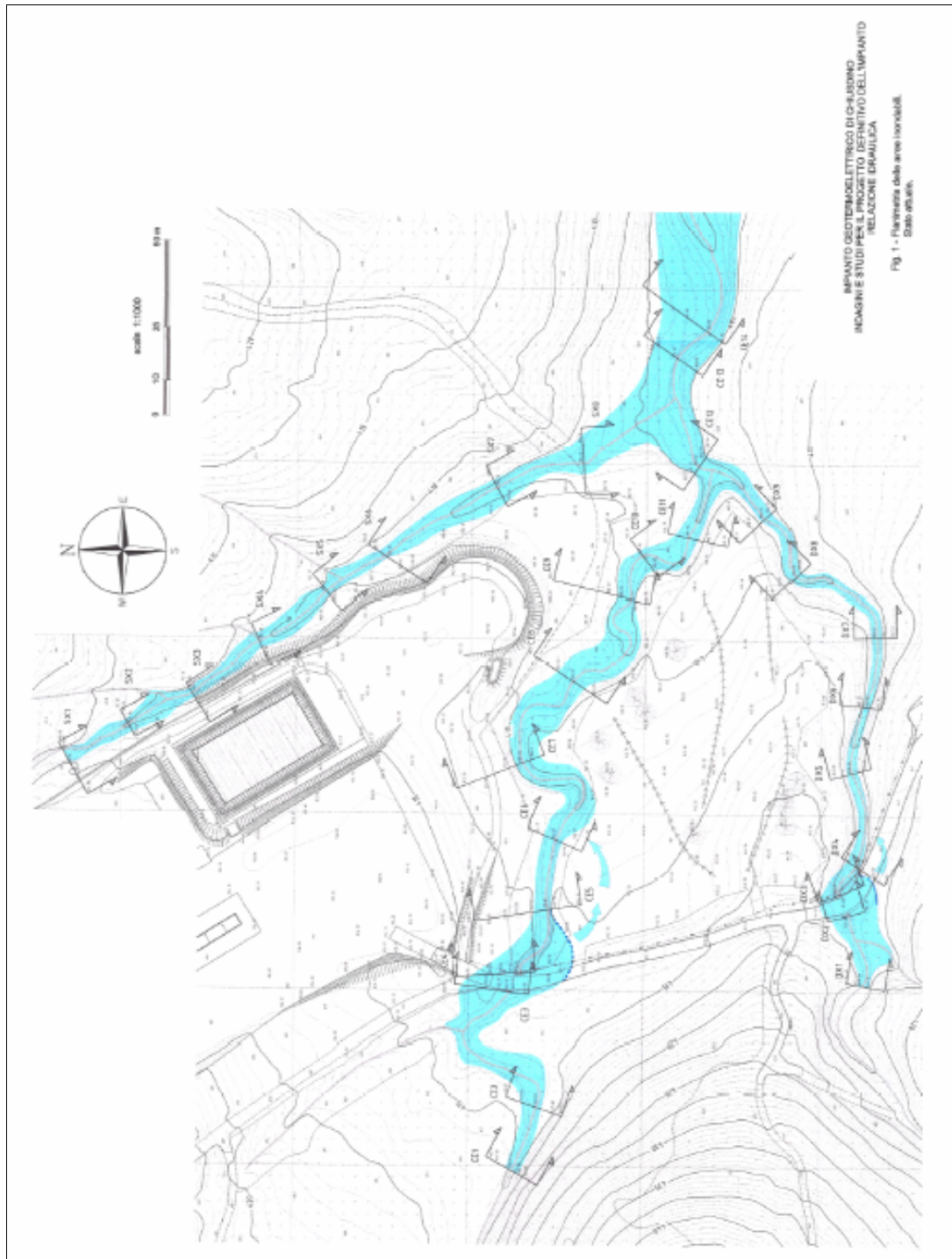


Fig. 10 – Estratto della relazione idraulica di supporto al progetto della centrale Enel (tavola aree allagate)

Nel suo complesso le sezioni idrauliche atte a rappresentare geometricamente i 3 corsi d'acqua risultano 17 per il Fosso Le Stregge, 11 per l'Affluente Destro e 9 per l'Affluente Sinistro.

Complessivamente le aste studiate risultano di lunghezza pari a circa 250 m per il Fosso Le Stregge, 180 m per l'Affluente Destro e 155 m per l'Affluente Sinistro.

Il Fosso Le Stregge presenta, a monte della centrale, un'opera di trattenuta dei materiali trasportati dalla corrente con funzione di protezione dell'attraversamento (intubamento di lunghezza circa 130 m),

in cui si individuano anche 2 salti idraulici; questo tratto è stato modellato considerando la vasca come sezione allargata ed inserendo i 2 salti come "Inline Structure".

Anche lungo l'Affluente Destro, parte di monte) è presente un attraversamento sulla viabilità vicinale; questo manufatto è stato rilevato e rappresentato geometricamente nel modello.

Come per il Fosso Fiumarello la modellazione è stata condotta in moto permanente, per assenza di vere aree contigue ai corsi d'acqua inondabili e per la caratteristica incassata degli stessi.

Al corso d'acqua sono stati assegnati valori del coefficienti  $n$  di Manning variabili tra 0.025 sm<sup>-1/3</sup> (in corrispondenza dei manufatti) fino a 0.045 sm<sup>-1/3</sup> (alveo naturale) .

La seguente tabella riassume le caratteristiche fisiche del modello idraulico congiunto.

<i>Corso d'acqua</i>	FOSSO LE STREGGE	
<i>Modellazione</i>	MOTO PERMANENTE	
<i>Lunghezza totale tratto studiato</i>	[m]	248,96
<i>Sezioni idrauliche "River Station"</i>	[n°]	17
<i>Ponti ("Bridge")</i>	[n°]	1
<i>Traverse ("Inline Structure")</i>	[n°]	3
<i>Scabrezza (coefficiente <math>n</math> di Manning)</i>	[s/m <sup>3</sup> ]	0.025-0.045
<i>Corso d'acqua</i>	AFFLUENTE SINISTRO	
<i>Lunghezza totale tratto studiato</i>	[m]	155.71
<i>Sezioni idrauliche "River Station"</i>	[n°]	9
<i>Ponti ("Bridge")</i>	[n°]	0
<i>Traverse ("Inline Structure")</i>	[n°]	1
<i>Scabrezza (coefficiente <math>n</math> di Manning)</i>	[s/m <sup>3</sup> ]	0.045
<i>Corso d'acqua</i>	AFFLUENTE DESTRO	
<i>Lunghezza totale tratto studiato</i>	[m]	183,26
<i>Sezioni idrauliche "River Station"</i>	[n°]	11
<i>Ponti ("Bridge")</i>	[n°]	1
<i>Traverse ("Inline Structure")</i>	[n°]	0
<i>Scabrezza (coefficiente <math>n</math> di Manning)</i>	[s/m <sup>3</sup> ]	0.025-0.045

Tab. 15 – Caratteristiche geometriche del modello idraulico del Fosso Le Stregge e Affluenti

Gli input idrologici imposti nella modellazione corrispondono ai valori dei picchi di portata precedentemente calcolati, per eventi pari a 20, 30, 100 e 200 e relativi a varie durate di precipitazione (Tab. 8).

Come condizioni al contorno sono state adottate le pendenze di moto uniforme, pari a 0.05, 0.04 e 0.032 per quanto riguarda le condizioni di monte rispettivamente di Stregge, Affluente Destro e Affluente Sinistro, e pari a 0.04 per la condizione di valle su Le Stregge.

Nella seguente Fig. 11 è rappresentato lo schema geometrico del modello congiunto di Hec-Ras del Fosso Le Stregge e suoi Affluenti.

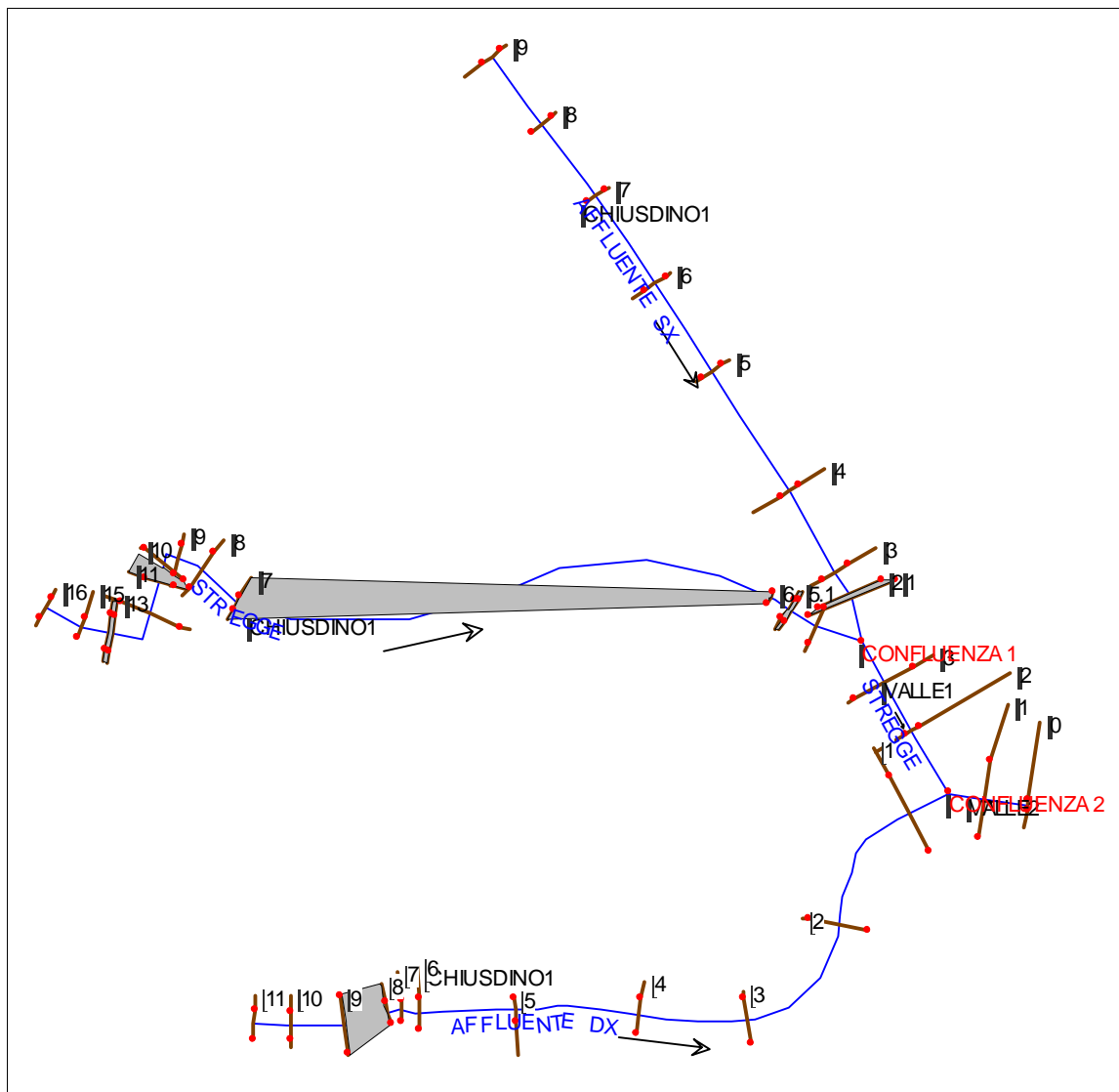


Fig. 11 – Modello geometrico Fosso Le Stregge e Affluente Destro e Sinistro

#### 4.5 Modello idraulico Torrente Trisondola

Il modello idraulico del Torrente Trisondola è costituito da un'unica asta principale descritta mediante l'acquisizione di 6 sezioni fluviali rilevate ad hoc per il presente lavoro.

Anche in questo caso, e a maggior ragione rispetto ai corsi d'acqua precedenti, sono state rilevate sezioni soltanto laddove vi è stata possibilità di accedere all'alveo, data l'assai fitta vegetazione infestante presente, e comunque esse risultano in numero sufficiente per descrivere adeguatamente l'andamento del corso d'acqua.

Complessivamente il tratto fluviale esaminato risulta pari a circa 460 m.

Lungo questo tratto non sono presenti manufatti o elementi di discontinuità nella sezione idraulica; risulta presenta solamente un guado lungo la stradella posta a monte dell'area oggetto di previsione.

Anche in questo caso è stata eseguita una modellazione in moto permanente del corso d'acqua.

I valori di scabrezza assegnati al Torrente Trisondola variano tra 0.045 sm<sup>-1/3</sup> e 0.05 sm<sup>-1/3</sup>.

La seguente tabella riassume le caratteristiche fisiche del modello idraulico.

<i>Corso d'acqua</i>	TORRENTE TRISONDOLO	
<i>Modellazione</i>	MOTO PERMANENTE	
<i>Lunghezza totale tratto studiato</i>	[m]	463,09
<i>Sezioni idrauliche "River Station"</i>	[n°]	6
<i>Ponti ("Bridge")</i>	[n°]	0
<i>Traverse ("Inline Structure")</i>	[n°]	0
<i>Scabrezza (coefficiente n di Manning)</i>	[s/m <sup>1/3</sup> ]	0.045-0.05

Tab. 16 – Caratteristiche geometriche del modello idraulico del Torrente Trisondola

I valori di portata introdotti nella modellazione, valutati per eventi pari a 20, 30, 100 e 200, corrispondono a quelli riportati in Tab. 12.

Come condizioni al contorno sono state adottate le pendenze di moto uniforme, pari a 0.0254 sia a monte che a valle.

Nella seguente Fig. 12 è rappresentato lo schema geometrico del modello di Hec-Ras del Torrente Trisondola.

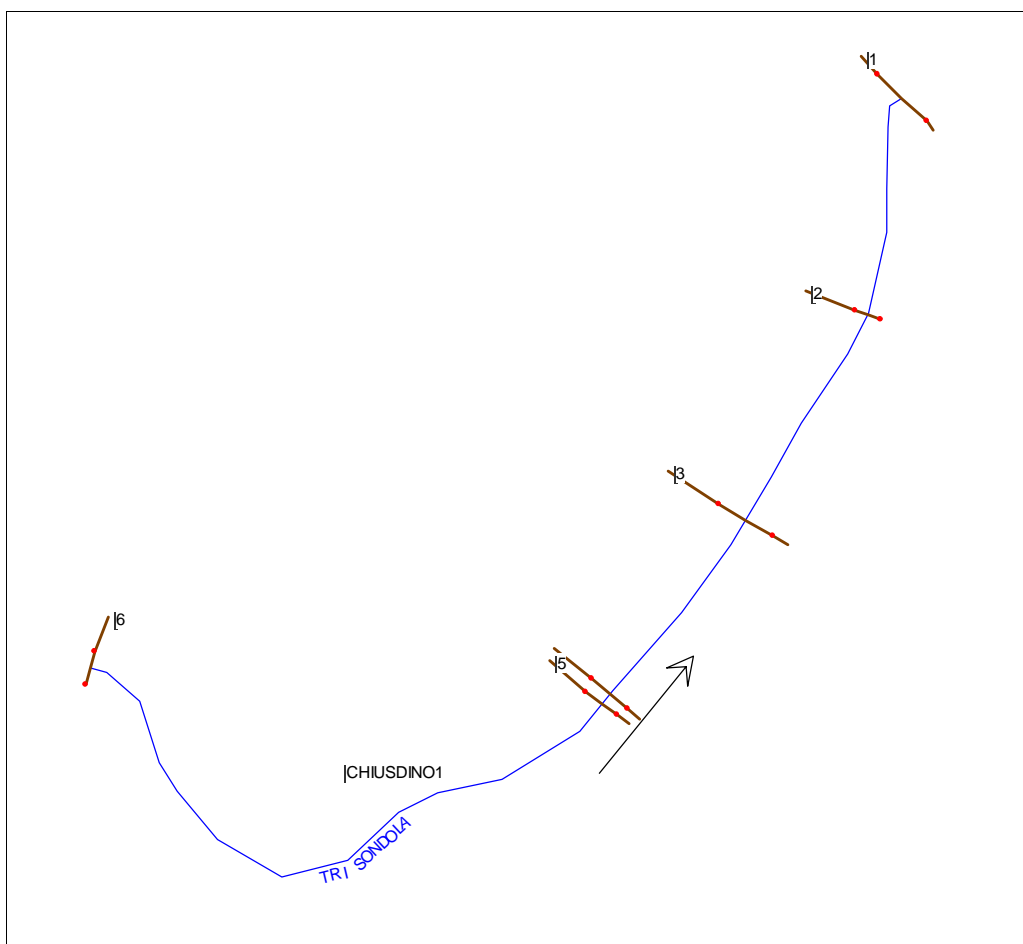


Fig. 12 – Modello geometrico Torrente Trisondola



## 5. RISULTATI DELLE MODELLAZIONI IDRAULICHE

### 5.1 Considerazioni sulle modellazioni e individuazione delle criticità

Una volta eseguite le elaborazioni numeriche col codice di calcolo Hec-Ras dei modelli appena descritti, sono stati acquisiti i dati di output relativi alle sezioni idrauliche allo stato attuale (Vedi Allegati).

Come anticipato, gli scenari studiati sono quelli con tempo di ritorno pari a 20, 30, 100 e 200 anni.

I risultati evidenziano come, trattandosi di corsi d'acqua a carattere torrentizio con alveo generalmente piuttosto incassato, la corrente abbia velocità sostenute e quindi venga contenuta nell'alveo stesso. Fanno eccezione i tratti più pianeggianti, ovvero dove le sponde presentano pendenze più dolci, lungo i quali le velocità si riducono e l'estensione della sezione bagnata si amplia esternamente all'alveo attivo.

Inoltre si osservano criticità in prossimità degli attraversamenti con luce libera sottodimensionata rispetto alla portata transitante, con conseguente incremento e del battente a monte dell'attraversamento ed eventuale sormonto della viabilità attraversata.

Di seguito sono illustrate nel dettaglio le dinamiche idrauliche in atto per eventi di piena lungo i singoli corsi d'acqua esaminati e le maggiori criticità puntuali.

#### FOSSO FIUMARELLO

Il Fosso Fiumarello presenta un alveo abbastanza incassato, con sponda maggiormente ripida in destra e più dolce in sinistra idraulica, lungo la quale si estende l'ampia zona a destinazione produttiva su sul Comune di Chiusdino (in previsione, area D2p) che sul Comune di Radicondoli (attuale e in previsione), compresa tra la S.P. n. 107 di Montalcinello e il corso d'acqua.

L'esondazione del corso d'acqua in sinistra si estende fino al raggiungimento delle quote altimetriche del piano campagna corrispondente ai livelli idrometrici di ciascuna sezione.

L'estensione di tale fronte di allagamento è maggiore nella parte di valle (Chiusdino), proprio di fronte all'area D2p, perché più pianeggiante, lungo la quale il corso d'acqua riduce la propria pendenza d'alveo.

Risulta determinante in questo anche l'elevata scabrezza dell'alveo, con vegetazione molto fitta.

Tuttavia l'estensione delle aree allagate per gli eventi maggiori (TR100 e TR200) non arriva ad interessare il perimetro dell'area oggetto previsione urbanistica, ma si limita alla fascia "di rispetto" da destinare ad area a verde.

E' da segnalare, benché esula dall'obiettivo del presente lavoro, che nel tratto studiato del Fiumarello ricadente sul territorio di Radicondoli si ha una criticità in corrispondenza dell'attraversamento sulla strada vicinale che porta alla centrale geotermica "Radicondoli 1", dove il corso d'acqua, anche per eventi con TR20, non riesce a transitare attraverso le 3 tubazioni circolari e quindi tende a sormontare la strada per poi ritrovare l'alveo immediatamente più a valle.

## FOSSO LE STREGGE E AFFLUENTI

Il Fosso Le Stregge, insieme ai suoi affluenti destro e sinistro, interseca o lambisce l'area D1p in cui è ubicata la centrale Enel di "Chiusdino 1".

Dalla modellazione eseguita non si evidenziano particolari criticità per l'area oggetto di previsione.

Peraltro le aree allagabili risultanti mostrano una buona attinenza con i risultati dello studio redatto a supporto del progetto della centrale geotermica (2007), riportati nella precedente Fig. 10.

L'opera di trattenuta e protezione del tratto intubato del Fosso Le Stregge risulta verificata anche per l'evento duecentennale, come anche la sezione dell'intubamento.

E' casomai da segnalare un franco di sicurezza non molto elevato in corrispondenza della sezione di ingresso del tratto intubato, come mostra il profilo idraulico in allegato.

Si segnala invece una criticità relativamente all'Afluente Destro, in corrispondenza dell'attraversamento della strada vicinale, immediatamente a monte dell'area di centrale.

Infatti l'opera di attraversamento risulta sottodimensionata rispetto alla portata centennale e duecentennale, perciò si verifica il sormonto da parte della corrente della strada, con immediato rientro in alveo senza alcun allontanamento di volumi.

Per quanto riguarda l'Afluente Sinistro, che corre lungo l'area di centrale, si osserva il completo contenimento dei volumi in alveo.

Ciò è verificato con evidenza anche nel tratto di monte non studiato (sezione non rilevabile per difficoltà di accesso), sempre adiacente all'area D1p, in quanto la differenza di quota tra il piano campagna della centrale e il fondo alveo è sempre superiore a 2.5-3 metri, sufficienti per garantire un adeguato franco di sicurezza rispetto al livello idrometrico in alveo relativo a portate assai ridotte ( $Q_{200}=5.226$  mc/s).

## TORRENTE TRISONDOLA

Il Torrente Trisondola, nel suo tratto studiato, ha in caso di piena un comportamento simile al Fosso Fiumarello precedentemente esaminato.

La portata di piena resta sostanzialmente contenuta in alveo a parte che lungo i tratti in cui un versante presenta pendenze più dolci; ciò avviene in particolare per il tratto in sponda sinistra tra la sezione iniziale ed il guado, con estensione dell'allagamento anche fino ad alcune decine di metri dal corso d'acqua.

L'area D2p oggetto di previsione non risulta interessata da allagamento se non nella sua porzione più prossima al corso d'acqua, peraltro non destinata all'edificazione, come mostra la Tav. 6 del Regolamento Urbanistico comunale.

## **5.2 Determinazione delle aree allagabili e delle pericolosità**

I risultati della modellazione sono stati restituiti come aree allagabili; esse sono mostrate, per tutti i tempi di ritorno studiati, nelle Tavv. 2a e 2b, e la loro osservazione supporta le considerazioni di cui al paragrafo precedente.

Il tracciamento di dette aree è stato eseguito per inviluppo dell'estensione planimetrica dei livelli idrometrici ottenuti per ciascuna sezione, utilizzando come riferimento altimetrico e base cartografica in particolare il rilievo appositamente eseguito a supporto del presente lavoro e, solo parzialmente, la C.T.R. 1:10.000.

Considerando che in molte sezioni la differenza dell'estensione planimetrica tra le aree allagate con differenti tempi di ritorno non è risultata significativa, nella classificazione dei contorni in corrispondenza di queste sezioni è stato assegnato il tempo di ritorno inferiore.

Per questo motivo nella citate Tavv. 2a e 2b le aree allagate risultano quasi esclusivamente riferirsi ai tempi di ritorno TR20 e TR100, in quanto praticamente coincidenti rispettivamente con TR30 e TR200.

Dal punto di vista della pericolosità idraulica risultante da queste aree allagate, in applicazione del D.P.G.R. 26/R/2007, ai contorni relativi a TR20 e TR30 corrisponderanno aree a pericolosità idraulica molto elevata (I.4), mentre ai contorni TR100 e TR200 corrisponderanno aree a pericolosità idraulica elevata (I.3).

Secondo le classificazioni del Piano di Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Fiume Ombrone ai contorni relativi a TR20 e TR30 corrisponderanno aree a pericolosità idraulica molto elevata (P.I.M.E.), mentre ai contorni TR100 e TR200 corrisponderanno aree a pericolosità idraulica elevata (P.I.E).

## 6. CONCLUSIONI

In conclusione del lavoro si può affermare come tutte le aree oggetto di previsione poste lungo i corsi d'acqua studiati non siano interessate da fenomeni esondativi.

Se per l'area D1p della centrale geotermica "Chiusdino 1" ciò è garantito dal fatto che l'area di centrale è posta a quota elevata rispetto ai corsi d'acqua che la lambiscono e il tombamento sul Fosso Le Stregge risulta adeguatamente dimensionato, per le altre aree D2p lungo il Fosso Fiumarello e il Torrente Trisondola la sussistenza di condizioni generali di sicurezza idraulica è dovuta al distanziamento che, a livello di progettazione urbanistica, si è voluto mantenere tra i corsi d'acqua e le aree di previsione, in modo tale che eventuali estensioni extra alveo del fronte di scorrimento della corrente potessero al più interessare soltanto tali fasce destinate ad attrezzature a verde.

Le poche criticità, peraltro non particolarmente significative, che emergono dagli studi sono state illustrate nel precedente Par. 5.1.

Per garantire un ulteriore livello di sicurezza agli insediamenti esistenti o futuri, si ritiene opportuno innanzitutto attivare una adeguata manutenzione sulle sponde dei corsi d'acqua (soprattutto per il Fiumarello e il Trisondola) almeno lungo i tratti prospicienti gli insediamenti, in modo da abbattere sensibilmente il livello idrometrico nelle sezioni più scabre.

Inoltre, in via cautelativa, appare opportuno garantire un franco di sicurezza di almeno 1 metro tra il piano di posa dei nuovi insediamenti e il livello idrometrico duecentennale risultante dalle modellazioni per ciascuna sezione idraulica.

Infine, per quanto riguarda l'attraversamento dell'Afluente Destro del Fosso Le Stregge lungo la viabilità che porta alla centrale geotermica di "Chiusdino 1", si raccomanda l'adeguamento dell'attraversamento mediante alcuni interventi quali, ad esempio, l'ampliamento della luce del sottopasso, la realizzazione di cordoli laterali a tenuta lungo l'attraversamento, la posa di una griglia di trattenuta del materiale trasportato all'imbocco della tubazione, la manutenzione in genere dell'opera.

## ELABORATI GRAFICI

**Tav. 1a** – Inquadramento delle aree oggetto di studio lungo il Fosso Le Stregge e il Torrente Trisondola e documentazione fotografica.

*(scala 1:1.000)*

**Tav. 1b** – Inquadramento dell'area oggetto di studio lungo il Fosso Fiumarello e documentazione fotografica.

*(scala 1:1.000)*

**Tav. 2a** – Carta delle aree allagate del Fosso Le Stregge e del Torrente Trisondola per eventi di piena con tempi di ritorno pari a 20, 30, 100 e 200 anni.

*(scala 1:1.000)*

**Tav. 2b** – Carta delle aree allagate del Fosso Fiumarello per eventi di piena con tempi di ritorno pari a 20, 30, 100 e 200 anni.

*(scala 1:1.000)*

## ALLEGATI

**Allegato Idraulico 1** – Risultati della modellazione idraulica del Fosso Fiumarello

**Allegato Idraulico 2** – Risultati della modellazione idraulica del Fosso Le Stregge e Affluenti

**Allegato Idraulico 3** – Risultati della modellazione idraulica del Torrente Trisondola