



**Ufficio Tecnico del Genio Civile
di Area Vasta Firenze-Prato-Pistoia-Arezzo**

**Comune di
Certaldo**

REGOLAMENTO URBANISTICO COMUNE DI CERTALDO

STUDIO IDROLOGICO IDRAULICO
L.R. n°1 03/01/2005 - D.P.G.R. n°26/R 27/04/2007
- D.P.C.M 06/05/2005

Relazione idrologico-idraulica

**Dirigente Ufficio Tecnico
del Genio Civile**

Ing. G. Fianchisti

Gruppo di Lavoro

Ing. F. Baroni

Ing. F. Martelli

Ing. V. Nencini

Ing. N. Pasotti

Geol. C. Simoncini

**Dirigente Settore Programmazione,
Pianificazione, Governo del Territorio
Comune di Certaldo**

Ing. P.G. Spannocchi

**Responsabile Assetto del Territorio
e Urbanistica Comune di Certaldo**

Arch. C. Vanni

Giugno 2010

Indice

1	PREMESSA	3
2	IMPOSTAZIONE METODOLOGICA	3
3	DEFINIZIONE DEL QUADRO CONOSCITIVO	4
4	ANALISI IDROLOGICA	5
4.1	DESCRIZIONE DEL BACINO IDROGRAFICO	5
4.2	ANALISI MORFOLOGICA	8
4.3	IL MODELLO IDROLOGICO.....	11
4.4	APPLICAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO.....	14
5	ANALISI IDRAULICA	17
5.1	IL MODELLO IDRAULICO DI MOTO VARIO	18
5.2	VERIFICHE IDRAULICHE DELLO STATO ATTUALE.....	20
5.2.1	<i>Aspetti generali</i>	20
5.2.2	<i>Fiume Elsa</i>	22
5.2.3	<i>Fosso in loc. Podere Il Piano</i>	23
5.2.4	<i>Borro dell’Inferno</i>	23
5.2.5	<i>Borro della Zufola</i>	23
5.2.6	<i>Torrente Agliena</i>	24
5.2.7	<i>Borro del Vicariato</i>	24
5.2.8	<i>Borro Corniola</i>	25
6	ANALISI DEI RISULTATI	25
6.1	FIUME ELSA	25
6.2	FOSSO IN LOC. PODERE IL PIANO	26
6.3	BORRO DELL’INFERNO	26
6.4	BORRO DELLA ZUFOLA	26
6.5	TORRENTE AGLIENA	26
6.6	BORRO DEL VICARIATO	26
6.7	BORRO CORNIOLA	26
7	CONDIZIONI DI FATTIBILITÀ DEGLI INTERVENTI	27
8	CONCLUSIONI	27

1 Premessa

Il presente studio idrologico-idraulico è redatto a supporto del Regolamento Urbanistico del Comune di Certaldo ai sensi del D.P.G.R. n. 26R/2007 della Regione Toscana in attuazione della L.R. 1/2005. Esso è inoltre finalizzato all'aggiornamento della pericolosità idraulica del Piano di Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Fiume Arno relativamente al territorio del suddetto Comune.

Lo studio è stato redatto dai tecnici dell'Ufficio Tecnico del Genio Civile di Area Vasta Firenze-Prato-Pistoia-Arezzo, la cui collaborazione con il Comune di Certaldo si inserisce nel percorso che la Regione Toscana ha intrapreso con l'Amministrazione comunale per la sperimentazione della L.R.1/2005. Gli ambiti e le forme di collaborazione sono stati concordati e sintetizzati nella nota del 06.11.2007 prot. n. A00GRT\286200.47.5 della Regione Toscana.

Lo studio risulta articolato nelle seguenti fasi:

- 1) fase conoscitiva: acquisizione della cartografia, dei dati di base, dei rilievi topografici e del modello digitale del terreno;
- 2) elaborazione idrologica: stima delle portate di piena per i tempi di ritorno di 20, 30, 100 e 200 anni attraverso l'utilizzo di un modello di piena a parametri concentrati;
- 3) analisi idraulica dello stato attuale con un modello idraulico in moto vario e individuazione delle criticità;
- 4) perimetrazione delle aree allagabili in funzione del tempo di ritorno;
- 5) individuazione delle pericolosità di cui al D.P.G.R. n. 26R/2007 della Regione Toscana e di quelle di cui al Piano di Assetto Idrogeologico;
- 6) definizione degli interventi necessari per l'attuazione delle previsioni.

2 Impostazione metodologica

Il presente lavoro è finalizzato alla verifica idraulica del medio corso del fiume Elsa e di tutti i suoi affluenti, già non studiati, che ricadono all'interno del Comune di Certaldo e alla conseguente individuazione, in funzione del tempo di ritorno e dei battenti sul piano campagna, del livello di pericolosità e degli interventi necessari alla messa in sicurezza idraulica.

Lo schema metodologico scelto si basa essenzialmente su criteri analitici che, partendo dagli eventi di precipitazione, conducono all'individuazione delle aree allagabili attraverso la simulazione dei fenomeni di formazione, propagazione ed esondazione dell'onda di piena. Tale schema è direttamente mutuato dalla metodologia utilizzata dal Piano di Assetto Idrogeologico per la definizione delle aree a pericolosità idraulica a livello di dettaglio.

La determinazione dei livelli idrici in alveo e nelle aree contermini dipende in sostanza dalla distribuzione spazio-temporale dei volumi di piena; pertanto gli stessi dipendono, a parità d'evento che li genera, dalla dinamica di propagazione e d'esondazione verificatasi nei tratti di monte e talvolta di valle.

E' pertanto necessario da un lato stimare gli idrogrammi di piena in arrivo al corso d'acqua, e dall'altro analizzarne la loro propagazione e laminazione per effetto di opere, esondazioni o diversivi. Di qui la necessità di un approccio integrato di tipo idrologico-idraulico che consideri l'asta fluviale d'interesse, il relativo bacino afferente e le connessioni idrauliche laterali per la simulazione dei fenomeni di tracimazione e inondazione.

Le sollecitazioni idrologiche al sistema, costituite in generale da eventi caratterizzati da intensità di pioggia variabili nel tempo e nello spazio e dalle "condizioni fisiche iniziali" del

bacino idrografico, vengono rappresentate da ietogrammi sintetici definiti in base alle curve di possibilità pluviometrica per preassegnata durata di pioggia e tempo di ritorno. Attraverso la modellistica idrologica vengono definiti gli idrogrammi di piena dei vari sottobacini afferenti all'asta fluviale studiata, tenendo conto che tali contributi di piena sono valutati adottando la stessa durata di pioggia e un coefficiente di ragguaglio areale tale da garantire una distribuzione spaziale coerente dell'evento.

La propagazione dei deflussi di piena così generati e la valutazione dei fenomeni di esondazione lungo l'asta fluviale, avviene tramite il modello idraulico di moto vario quasi-bidimensionale, più avanti descritto, in grado di fornire in ogni sezione dell'asta fluviale l'idrogramma di piena in transito e i volumi eventualmente tracimati dalle strutture di contenimento.

Da evidenziare che l'analisi svolta ipotizza che i fenomeni di esondazione si manifestino esclusivamente per tracimazione delle portate di piena sopra la quota di massimo contenimento e loro successiva diffusione nel territorio adiacente.

Risultano inoltre trascurati i fenomeni di:

- collasso di strutture di contenimento (argini, sponde, muri, ecc.) e dei ponti;
- ostruzione temporanea delle sezioni fluviali dovute al trasporto di materiale flottante;
- modifica della forma e dimensioni delle sezioni fluviali per dinamica d'alveo (erosione, trasporto e deposito di materiale solido);
- effetti legati alla bidimensionalità della propagazione flussi nelle aree allagabili.

Per determinare la pericolosità idraulica delle aree in esame sono stati realizzati i seguenti modelli idraulici:

- 1) Fiume Elsa dalla confluenza con il T. Drove presso Poggibonsi (SI) fino allo scolmatore di Castelfiorentino (FI) considerando gli apporti dei numerosi affluenti;
- 2) Fosso in loc. P.re Piano;
- 3) Borro dell'Inferno;
- 4) Borro della Zufola;
- 5) Borro del Vicariato;
- 6) Torrente Agliena, dal Piano d'Agliena fino alla confluenza con il Fiume Elsa;
- 7) Borro Corniola.

Il Borro di Casanova, il fosso Giuncaia, il torrente Avanella e il torrente Avane non sono stati considerati nel presente studio in quanto oggetto di altri studi in possesso del Comune di Certaldo.

3 Definizione del quadro conoscitivo

Per la redazione del presente studio sono stati acquisiti i dati territoriali disponibili presso le pubbliche Amministrazioni, nonché è stata eseguita una campagna di rilievi topografici. In particolare sono stati acquisiti:

- CTR vettoriale in scala 1:2.000 [Regione Toscana, in seguito R.T.];
- CTR vettoriale in scala 1:10.000 [R.T., 1998];
- Cartografia IGM in scala 1:25.000;
- modello digitale del terreno con celle 1x1 m (Laser-scanning) del fondovalle del fiume Elsa [R.T.];

- modello digitale del terreno con celle 10x10 m dell'intero bacino del fiume Elsa [R.T., 1998];
- progetti di opere idrauliche e di attraversamento dei corsi d'acqua [Ufficio Tecnico del Genio Civile di Firenze];
- reticolo superficiale delle acque [R.T.];
- reticolo idrografico allegato alla D.C.R. 230/1994 e al P.I.T.[R.T.];
- annali e dati idrologici (1921 - 2002) forniti dal Servizio Idrologico della Regione Toscana;
- strati informativi delle informazioni geo-litologiche e di uso del suolo (Corinne Land Cover) [R.T., Autorità di Bacino];
- strati informativi delle aree allagate e delle pericolosità contenute nel Piano di Assetto Idrogeologico [Autorità di Bacino];
- progetto definitivo, compreso lo studio idraulico a supporto dello stesso, della variante alla strada S.R.T. 429 e relativi rilievi topografici [R.T., Provincia di Siena];
- progetto esecutivo della variante alla strada S.R.T. 429 [Provincia di Siena];
- studio di area vasta del bacino del fiume Elsa [R.T., Provincia di Siena, Circondario Empolese Valdelsa];
- sezioni fluviali disponibili presso l'Autorità di Bacino del Fiume Arno;
- sezioni fluviali ricavabili dalla documentazione in possesso del Comune di Certaldo;
- sezioni fluviali utilizzate per lo studio idraulico della variante S.R.T. 429;
- rilievo topografico, condotto nell'ambito del presente studio, di sezioni fluviali aggiuntive sul fiume Elsa e sui suoi affluenti ricadenti nel Comune di Certaldo (Migliorini, 2008);
- rilievo topografico, condotto nell'ambito del presente studio, delle quote di contenimento di tutte le arginature del fiume Elsa presenti nel Comune di Certaldo per una densità media di circa 1 punto ogni 50 m (Migliorini, 2008);
- rilievo topografico, condotto nell'ambito del presente studio, delle dimensioni e quote di tutti i sottopassi delle ferrovie nel territorio comunale di Certaldo (Migliorini, 2008);
- le informazioni desumibili dalla cartografia e dal rilievo topografico sono state integrate attraverso sopralluoghi e indagini sul posto.

4 Analisi idrologica

L'analisi idrologica è stata condotta attraverso una preliminare analisi morfologica e idrografica del reticolo e dei relativi bacini. Le grandezze ricavate sono state utilizzate nel modello di piena a parametri concentrati, denominato Al.To. 2000 [4-5], basato sull'idrogramma unitario istantaneo di Nash [4-5], i cui parametri sono stati stimati attraverso metodi di regionalizzazione. La stima delle portate è eseguita con il metodo indiretto, ipotizzando cioè che il tempo di ritorno dei deflussi di piena sia lo stesso degli eventi meteorici utilizzati in ingresso al modello. Quest'ultimi sono stati ricavati dalle curve di possibilità pluviometrica delle stazioni pluviometriche della Regione Toscana. Il modello è stato cimentato per vari tempi di ritorno con ietogrammi sintetici di varia durata a intensità costante.

4.1 DESCRIZIONE DEL BACINO IDROGRAFICO

Inquadramento territoriale

Il fiume Elsa si trova sul versante tirrenico dell'Appennino settentrionale ed è un affluente di sinistra del fiume Arno. Il suo bacino è compreso tra 43° 15' 57" e 34° 38' 47" di latitudine Nord e tra 1° 31' 44" e 1° 07' 00" di longitudine Ovest da Monte Mario, ed ha una superficie di 860 Km². Il bacino si inserisce all'interno delle Province di Firenze, Siena e Pisa.

Il fiume Elsa nasce sul versante occidentale della Montagnola Senese nel comune di Sovicille in provincia di Siena da tre sorgenti situate a quote comprese tra 550 e 630 m s.l.m. Le tre sorgenti si riuniscono dopo poche centinaia di metri a formare un unico corso d'acqua che assume il nome di Elsa Morta. Il corso del fiume prosegue attraversando il Pian della Speranza ed il Pian dell'Olmino e si ingrossa ricevendo le acque della Senna e del botro degli Strulli, fino a raggiungere il centro abitato di Colle Val d'Elsa. Proseguendo il suo corso verso Nord, il fiume incontra l'abitato di Poggibonsi, nei pressi del quale il fiume vede incrementata in maniera netta la sua portata grazie al contributo del torrente Staggia, in destra idrografica da Sud-Est, e del torrente Foci, in sinistra idrografica da Sud-Ovest, che per dimensioni e volumi d'acqua sono paragonabili al fiume Elsa stesso.

Una volta superato il centro di Poggibonsi, il fiume prosegue nella bassa Valdelsa in direzione Nord-Ovest entrando nel comune di Barberino, dove riceve le acque di numerosi piccoli affluenti come l'Abese, lo Zambra e l'Avane, fino a giungere a Certaldo, dove incontra il torrente Agliena in destra ed il torrente Casciani in sinistra.

Superato Certaldo, il fiume prosegue il suo corso ricevendo il contributo di affluenti quali il torrente Pesciola e il rio Pietroso, nei pressi dell'abitato di Castelfiorentino, per poi giungere fino a Ponte a Elsa, senza ricevere ulteriori apporti significativi, ed immettersi in Arno, alla quota di 15 m s.l.m., dopo aver compiuto un percorso di circa 82 Km.

L'intero bacino dell'Elsa è composto da tre parti fondamentalmente diverse fra loro per aspetti che riguardano la loro geomorfologia ed il ruolo che rivestono nella formazione delle piene [1].

Il tratto più a monte comprende tutto il territorio dell'alta Valdelsa. La zona è costituita da un ventaglio di vallate i cui corsi d'acqua, quali lo Staggia, il Drove ed il Foci, confluiscono in Elsa nei pressi del centro abitato di Poggibonsi. Una simile conformazione determina un vistoso aumento dei deflussi nel medio e basso corso del fiume, ed è la causa di fenomeni alluvionali ed allagamenti frequenti per tutta la zona della bassa Valdelsa, fino alla confluenza in Arno. A Poggibonsi, infatti, iniziarono i primi straripamenti sia durante la piena del 1949 che durante l'evento del 1966.

Il secondo tratto del fiume Elsa si estende da Poggibonsi fino a Castelfiorentino ed è caratterizzato da un tracciato piuttosto ampio, alimentato da affluenti di breve percorso, tra i quali si ritrovano i già citati torrenti Agliena, Cascinai, Pesciola ed Rio Pietroso.

Il tratto terminale, da Castelfiorentino fino allo sbocco in Arno, è caratterizzato da versanti brevi e da quote basse. In questa zona si rilevano, pertanto, incrementi minimi di deflusso e di portata al colmo.

L'abitato di Castelfiorentino è by-passato dal sistema *“scolmatore-cassa di espansione madonna della Tosse”*.

Caratteristiche geolitologiche

All'interno del bacino del fiume Elsa è possibile riconoscere quattro grandi unità morfologiche:

- la dorsale dei Monti del Chianti, che occupa la parte meridionale del bacino, costituita da rocce arenacee e calcareo-marnose e caratterizzata da valli con versanti ripidi e profili a “V” asimmetrici con frequenti rotture di pendio;
- la dorsale della Montagnola Senese, presente anch'essa nella parte più meridionale del bacino, composta prevalentemente da rocce calcaree dalle forme arrotondate e di morfologia carsica;
- le zone collinari, che occupano la gran parte del bacino, formate da sabbie, argille e conglomerati di origine pliocenica, di forma arrotondata o piatta, con orli incisi da

calanchi, nel caso delle argille, oppure con fianchi a gradinata, in caso di presenza di ciottolami o sabbie;

- le spianate di travertino, che occupano il territorio compreso fra Colle Val d'Elsa e Monteriggioni, incise da gole profonde.

Le formazioni geologiche presenti all'interno del bacino risalgono, per la gran parte, al periodo Terziario ed, in particolare, sono del Paleogene il Monte Maggio e la Montagnola Senese, mentre tutti gli altri rilievi della Valdelsa vengono fatti risalire al Neogene.

I fenomeni tettonici e paleografici che hanno determinato la formazione della Valdelsa fanno parte del complesso di deformazioni che portarono all'orogenesi della dorsale appenninica Tosco-Emiliana. L'Appennino Centrosettentrionale trae origine da una progressiva emersione delle terre, dovuta a deformazioni compressive delle formazioni terziarie del territorio toscano. Tali movimenti hanno determinato la formazione dei crinali che delimitano le valli in cui oggi scorrono i principali affluenti di sinistra del fiume Arno, di cui fa parte anche il fiume Elsa.

Alla fase compressiva è seguito poi un fenomeno rigido distensivo che ha determinato la formazione di strutture ad Horst e Graben con sviluppo prevalente in direzione Nord-Ovest Sud-Est, la frammentazione in blocchi rigidi della crosta terrestre con generazione di faglie dirette e ripetuti movimenti alterni di sollevamento e sprofondamento.

I segni di questa evoluzione tettonica sono rilevabili nel bacino del fiume Elsa negli affioramenti dei terreni più grossolani posti a quote più elevate e nell'andamento del corso del fiume, che segue lo sviluppo appenninico (NO-SE).

A partire dal Miocene Superiore si è avuta una fase di sprofondamento, che ha generato diversi bacini lacustri e salmastro-marini. Il mare andò ad occupare gran parte del territorio toscano, fino ai piedi dei monti del Chianti. Nel Pliocene Superiore ha avuto inizio una fase di sollevamento non uniforme, con oscillazioni successive, che hanno determinato una rapida regressione marina ed influenzato notevolmente gli ambienti di sedimentazione. Risalgono a questa fase tettonica le formazioni litologiche delle sabbie e delle argille presenti nel bacino del fiume Elsa. Nel Pleistocene la zona è stata caratterizzata da fenomeni erosivi lungo i versanti ed alluvionali nelle depressioni.

Attualmente la successione stratigrafica del bacino è costituita, dall'alto verso il basso, dalle seguenti unità litologiche:

- depositi alluvionali,
- complesso dei terreni autoctoni marino-lacustri (argille, sabbie e conglomerati pliocenici),
- unità liguri (alberese, formazione di Sillano, ofioliti, pietraforte),
- falda toscana (arenarie, calcare cavernoso, macigno),
- serie metamorfica toscana (calcari cristallini, calcari stratificati, scisti silicei, diaspri, calcescisti).

Uso del suolo

Facendo riferimento alla carta dell'uso del suolo Corinne Land Cover, nel bacino del fiume Elsa prevalgono le aree a seminativo sia nelle zone di pianura che in quelle collinari. Sui rilievi le coltivazioni lasciano il posto ai boschi e, in piccola parte, ai prati stabili.

A scala di bacino la pressione antropica non appare ad elevata intensità e le aree urbane coincidono con i principali centri abitati: Colle Val d'Elsa, Poggibonsi, S. Gimignano, Certaldo, Gambassi Terme e Castelfiorentino. Ad ogni modo si rileva la forte crescita degli agglomerati urbani nell'ultimo decennio.

Parametri morfologici

Il bacino del fiume Elsa ha una superficie (A) di 860 Km², la quota massima e minima sono rispettivamente di 684 e 14 m s.l.m., con un rilievo di 670 m, il perimetro (P) misura 254 Km e la lunghezza dell'asta principale (L) è pari a 82 Km. Dalle precedenti grandezze, calcolate dalla cartografia tecnica regionale in scale 1:10.000, si possono stimare i seguenti parametri, utili a caratterizzare la morfologia e la risposta idrologica del bacino:

$$\text{Indice di forma} \quad I_f = \frac{A}{L^2} \cong 0.13$$

$$\text{Rapporto di allungamento} \quad R_{al} = \frac{L}{2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}}} \cong 2.5$$

[10]

$$\text{Rapporto di circolarità} \quad R_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2} \cong 0.17$$

$$\text{Coefficiente di uniformità} \quad R_u = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \cong 2.44$$

Attraverso l'elaborazione del modello digitale del terreno (cluster 10x10 m, 1998) sono stati stimati, con procedure sviluppate in ambiente GIS, la quota media (230 m slm) e la pendenza media dei versanti (17%).

Reticolo idrografico

Il reticolo superficiale può essere classificato di tipo subdendritico a canale rettilineo [4]: l'asta principale del fiume Elsa riceve le immissioni pressoché ortogonali del reticolo secondario, i cui bacini risultano generalmente di forma stretta e allungata.

4.2 ANALISI MORFOLOGICA

Il reticolo idrografico è stato definito attraverso la composizione del reticolo delle acque superficiali in scala 1:10.000, così come individuato dalla Regione Toscana, e del reticolo individuabile da cartografia IGM 1:25.000.

Tutti i rami del reticolo individuato e le corrispondenti aree drenate sono stati gerarchizzati secondo il metodo Horton-Strahler [10]. Sono stati quindi calcolati il numero delle aste fluviali, la lunghezza e l'area relativi ad ogni ordine gerarchico, nonché i rapporti di biforcazione (R_b), di lunghezza (R_l) e di area (R_a) attraverso regressione logaritmica. Sono stati inoltre determinati l'area del bacino (A) e la lunghezza media cumulata del reticolo (L_{mc}), calcolata come cumulata delle lunghezze medie per i vari ordini gerarchici [10].

La Tavola 1 allegata mostra la gerarchizzazione del reticolo idrografico.

I parametri morfologici R_b , R_l e R_a sopra elencati possono essere calcolati, una volta ordinato il reticolo idrografico e le aree afferenti secondo Strahler, sulla base delle regressioni delle seguenti note relazioni:

$$\begin{aligned} N_u &= R_b^{\omega-u} \\ \bar{L}_u &= \bar{L}_1 R_l^{u-1} \\ \bar{A}_u &= \bar{A}_1 R_a^{u-1} \end{aligned} \quad [4-5]$$

dove:

ω = ordine massimo del reticolo;

N_u = numero delle aste di ordine u ;

\bar{L}_u = lunghezza media delle aste di ordine u ;

\bar{A}_u = area media sottesa da aste di ordine u .

In analogia alle scelte fatte nello studio di regionalizzazione delle portate della Regione Toscana, le regressioni sono state eseguite secondo le seguenti specifiche:

1. nel calcolo di R_b l'ordine massimo considerato è $\omega-1$;
2. R_l è stato calcolato considerando le lunghezze medie di ciascun ordine gerarchico;
3. per la stima di R_a è stato considerato al più il quinto ordine gerarchico.

Soltanto per i bacini di ordine 3 l'ordine massimo considerato per il calcolo di R_b è ω .

A titolo di esempio si riportano le regressioni eseguite per l'intero bacino del fiume Elsa.

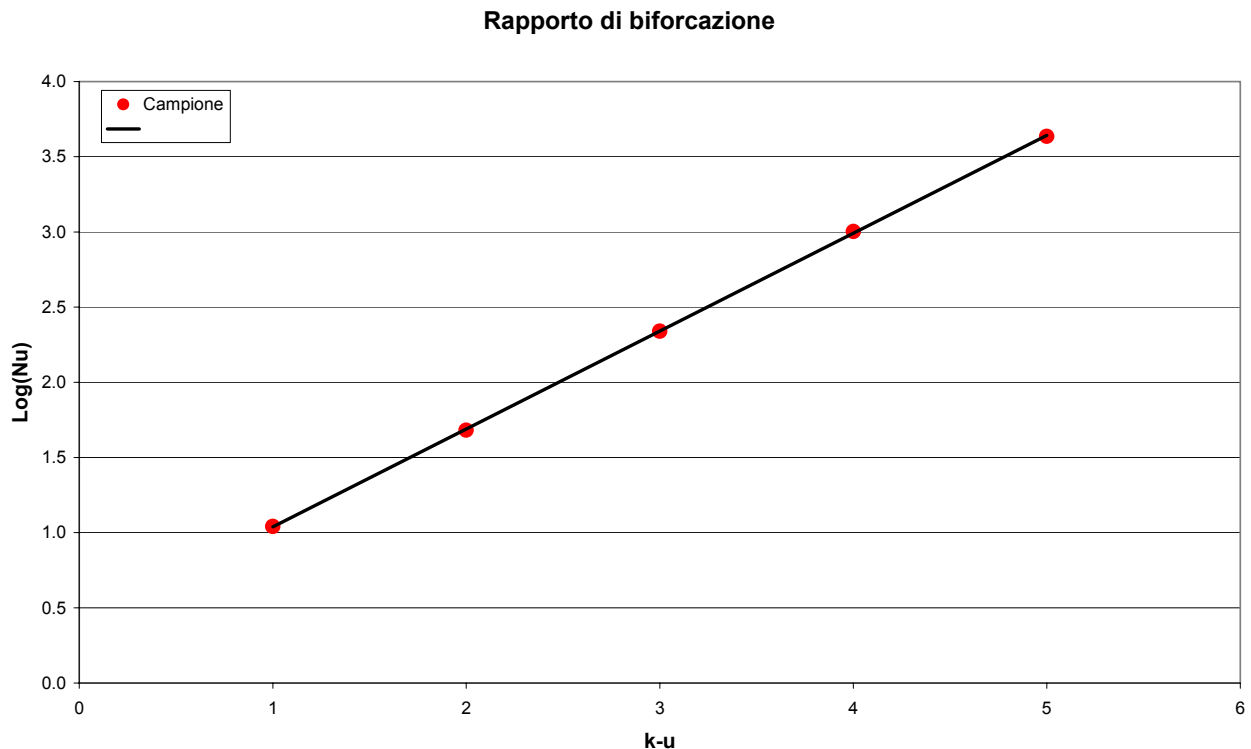


Figura 4-1: Rapporto di biforcazione del F. Elsa alla confluenza

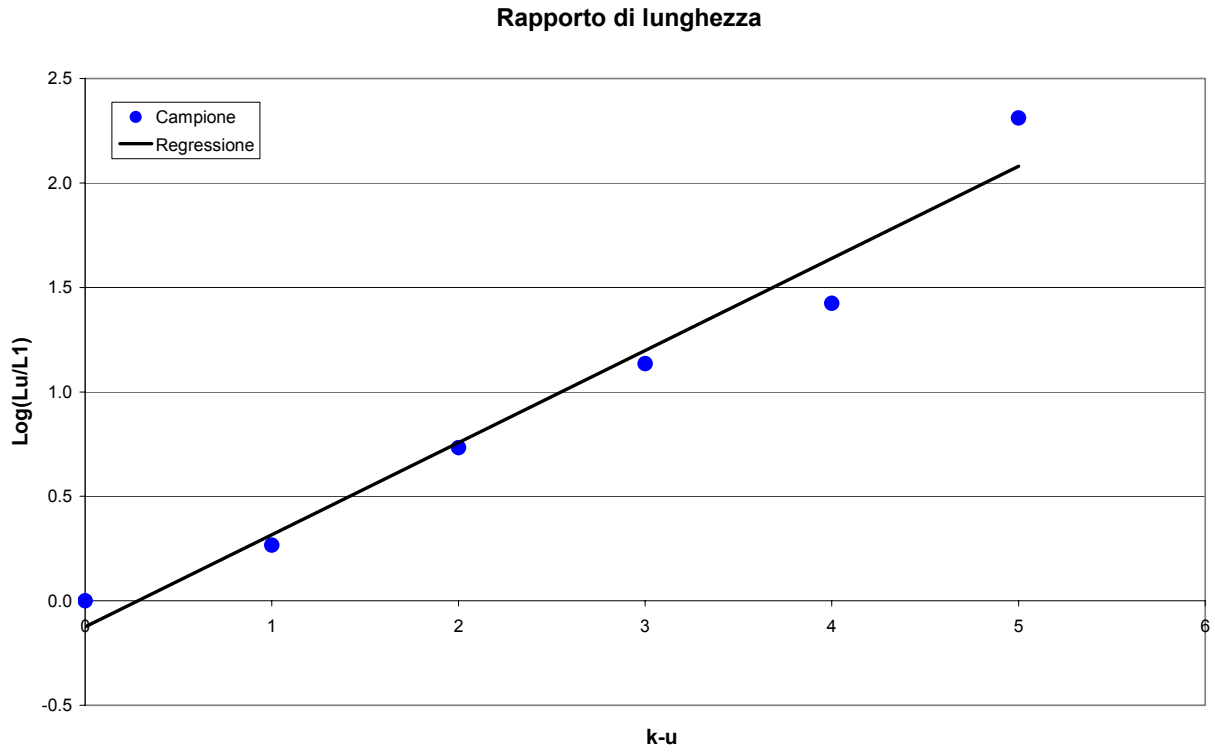


Figura 4-2: Rapporto di lunghezza del F. Elsa alla confluenza

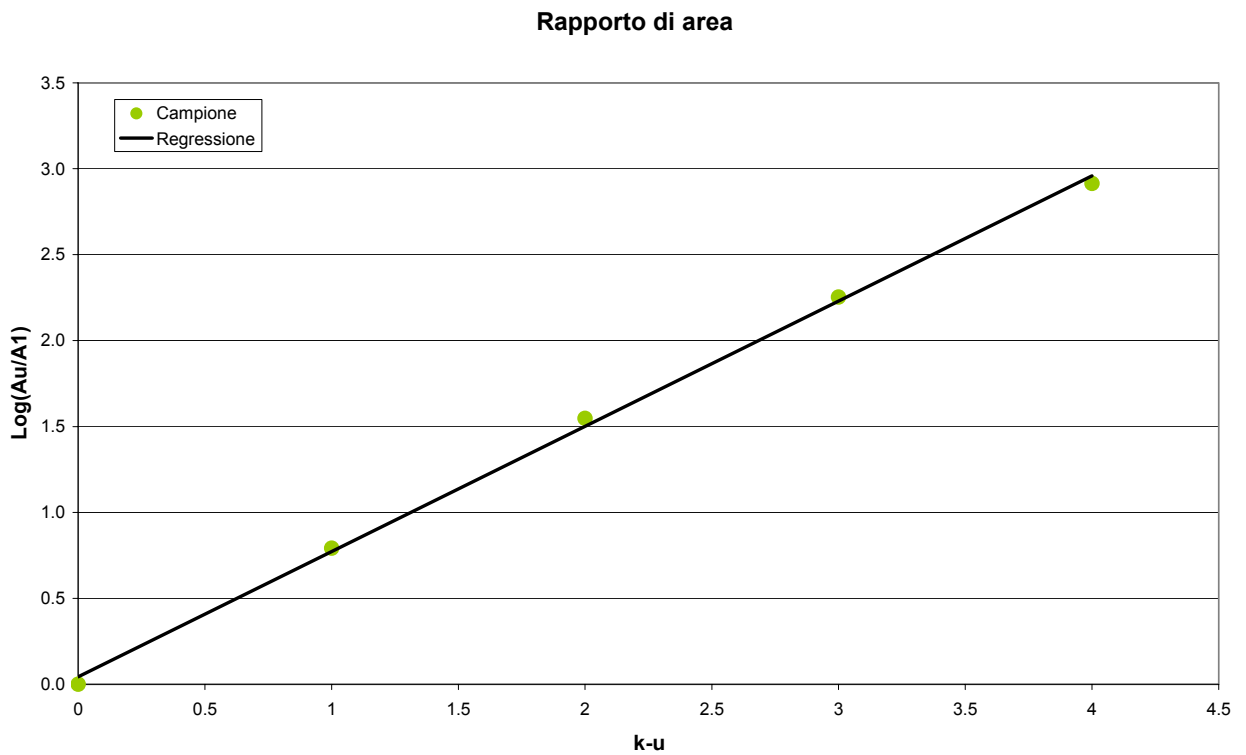


Figura 4-3: Rapporto di area del F. Elsa alla confluenza

4.3 IL MODELLO IDROLOGICO

A seguito della preliminare analisi morfologica e idrografica del bacino e del reticolo idrografico di cui al precedente paragrafo, è stata condotta l'analisi idrologica per la stima degli idrogrammi di piena. Questi sono stati stimati attraverso il modello di piena concettuale a parametri concentrati Al.To. 2000, basato sull'idrogramma istantaneo unitario di Nash, di cui riportiamo di seguito le linee principali [4-5].

L'input meteorico è rappresentato da uno "ietogramma sintetico" la cui frequenza viene stimata a partire dalle curve di possibilità climatica, ricavate con l'adattamento della TCEV.

Le curve di possibilità pluviometrica sono espresse dalla seguente formula:

$$h=at^nT^m$$

dove a , n e m sono i parametri, t [h] la durata dell'evento, T [anni] il tempo di ritorno e h [mm] l'altezza di pioggia.

Qualora siano necessarie più stazioni di misura per caratterizzare il regime pluviometrico del bacino di interesse, lo ietogramma sintetico è calcolato attraverso il metodo dei topoi di Thiessen applicato ai parametri delle curve di possibilità pluviometrica.

Il modello è strutturato in modo da ricercare, per un dato tempo di ritorno, il valore critico della durata di pioggia che massimizza la portata di piena, in funzione delle caratteristiche morfologiche del bacino idrografico. Viene in tal modo definita una pioggia di determinata durata con intensità costante. In alternativa è possibile definire ietogrammi di qualsiasi forma e durata.

L'input pluviometrico è stato ragguagliato al bacino attraverso il metodo del coefficiente di ragguaglio areale K_r . Questo è espresso nel modo seguente:

$$K_r = 1 - \exp(-\alpha t^\beta) + \exp(-\alpha t^\beta - \gamma A)$$

dove α , β e γ sono i parametri della formula, t [h] è la durata della precipitazione e A [km²] è l'area del bacino.

Per la Regione Toscana sono stati stimati i seguenti valori dei parametri:

$$\alpha = 0.036 a$$

$$\beta = 0.25$$

$$\gamma = 0.01$$

dove a è il parametro della curva di possibilità pluviometrica utilizzata.

Le opzioni di calcolo del programma permettono inoltre il ragguaglio areale per mezzo di un coefficiente K_r costante definito dall'utente, oppure di tipo "globale".

L'opzione "globale" calcola il coefficiente di ragguaglio areale K_r considerando che i deflussi del bacino in oggetto si sommano a quelli di un bacino principale di monte. Pertanto, considerando tale bacino come sottobacino del sistema complessivo, il coefficiente di ragguaglio

K_r è calcolato affinché il coefficiente del bacino di valle (somma di quello principale e del sottobacino) sia uguale a quello stimabile con la formula sopra presentata. Ciò equivale ad imporre che l'altezza di pioggia calcolata sul bacino complessivo coincida con quella ricavabile dalla sommatoria delle altezze calcolate singolarmente per il bacino di monte ed il sottobacino.

In pratica si assume per il sottobacino un coefficiente di ragguaglio K_r che mantenga inalterato il valore del coefficiente di ragguaglio K_r pertinente al bacino di valle assumendo come peso l'area dei bacini stessi secondo la seguente formula:

$$K_r = \frac{K_v A_v - K_m A_m}{(A_v - A_m)}$$

dove: K_v = coefficiente di ragguaglio areale per il bacino di valle; A_v = area del bacino di valle; K_m = coefficiente di ragguaglio areale per il bacino di monte; A_m = area del bacino di monte.

Il metodo per studiare la risposta idrologica in termini di deflussi è quello basato sul cosiddetto *idrogramma istantaneo unitario* (*Instantaneous Unit Hydrograph, IUH*), vale a dire l'idrogramma di piena causato da un evento impulsivo di pioggia di volume unitario e durata tendente a zero. Infatti, con le ipotesi di linearità e stazionarietà della risposta, l'idrogramma di piena può essere calcolato tramite la convoluzione fra idrogramma efficace e IUH:

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

dove:

$Q(t)$ è la portata defluente;

$p(t) = A i(t)$ con A area del bacino e $i(t)$ intensità di pioggia netta ragguagliata sul bacino;

$U(t)$ = idrogramma unitario per cui $\int_0^{\infty} U(t) dt = 1$

Il momento di primo ordine dell'IUH rispetto all'origine (baricentro) è definito dalla

$$Tl = \int_0^{\infty} U(t) t dt = 1$$

dove viene detto tempo di ritardo Tl .

Il modello di trasferimento adottato è quello dell'idrogramma unitario di tipo $I(n,k)$ introdotto da Nash e caratterizzato dal parametro di *forma* (n) e da quello di *scala* (k).

$$U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{(n-1)} e^{-\frac{t}{k}} \quad [4]$$

In questo schema il tempo di ritardo è dato dal prodotto $n \cdot k$.

I parametri n , k e Tl dell'idrogramma unitario di Nash possono essere ricavati sulla base delle caratteristiche morfologiche del reticolo idrografico, mediante le seguenti espressioni:

$$n = 3.29 (Rb/Ra)^{0.78} Rl^{0.07}$$

$$k = 0.7 [Ra/(Rb Rl)]^{0.48} L/\nu$$

$$Tl = 2.3 \left(\frac{Rb}{Ra} \right)^{0.3} Rl^{-0.41} \frac{L}{\nu}$$

dove, oltre ai simboli noti, ν è il fattore cinematico legato alla velocità della piena (“media spazio-temporale di scorrimento dell'acqua o di propagazione dell'onda di piena”).

Lo studio di regionalizzazione, attraverso la taratura sistematica dei dati relativi ad eventi registrati nei 42 bacini strumentati dal Servizio Idrografico, ha fornito una relazione fra i valori di Tl [ore] ed i parametri morfologici:

$$Tl = 0.42 \left(\frac{Rb}{Ra} \right)^{0.3} Rl^{-0.41} \frac{Lmc}{A^{0.075}}$$

La trasformazione da pioggia reale a netta adottata richiede la stima di due parametri: la perdita iniziale è schematizzata introducendo un *volume unitario di perdita iniziale* (indicato con I_a) che assorbe completamente la precipitazione durante i primi momenti dell'evento (dall'istante iniziale dell'evento $t=0$ sino all'istante $t=t_a$), mentre la perdita durante l'evento viene schematizzata con una *infiltrazione costante a saturazione* (indicata con K_s):

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

se $t < t_a$

$$P_n(t) = 0$$

$$I_a(t) = I_a$$

se $t \geq t_a$

$$P_n(t) = P(t) - K_s$$

dove:

$P(t)$ intensità di precipitazione ragguagliata sul bacino [mm/h];

$P_n(t)$ intensità di precipitazione netta sul bacino [mm/h];

$I_a(t)$ perdita iniziale all'istante t dell'evento [mm];

$I_a = I_a(t_a)$ volume di perdita iniziale per unità di area [mm];

K_s = velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h].

I parametri utilizzati per il calcolo delle portate di piena risultano, in sostanza, i seguenti:

- I_a volume unitario di perdita iniziale [mm];
- K_s velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h];
- n parametro di forma dell'idrogramma di Nash [-];
- k parametro di scala dell'idrogramma di Nash [h].

Nello studio di regionalizzazione, i valori di I_a e K_s sono tarati e calcolati in funzione della litologia dei bacini, resi indipendenti dalle dimensioni del bacino idrografico. In particolare I_a è correlato alla percentuale di superficie boscata del bacino idrografico secondo la relazione:

$$I_a = 3.3 + 22P_{ab} \quad (P_{ab} = \text{percentuale di superficie boscata del bacino})$$

mentre K_s dipende dalle caratteristiche litologiche.

Descrizione formazione litologica	Ks medio [mm/s]
depositi limoso-argillosi moderatamente consistenti	0
depositi limoso-argillosi consistenti	0
depositi sabbiosi moderatamente addensati	2.325
depositi sabbiosi addensati poco cementati	2.325
depositi superficiali incoerenti a granulometria variabile a prevalente compo	3.1
rocce carbonatiche massicce o stratificate in grossi banchi	0.775
rocce carbonatiche stratificate	7.75
rocce carbonatiche vacuolari	3.875
rocce silicee	3.875
rocce ignee basiche ed ultrabasiche e derivati metamorfici	0
rocce intrusive acide o intermedie	0
conglomerati e breccie poco cementati	0.775
rocce carbonatiche vacuolari o poco cementate	7.75
arenarie deboli	2.325
rocce arenacee con interstrati pelitici	1.55
rocce carbonatiche con interstrati pelitici	4.65
rocce carbonatiche alternate a rocce pelitiche	4.65
rocce metamorfiche costituite da alternanze di livelli lapidei e pelitici	0
rocce pelitiche con intercalazioni lapidee	0
complessi a struttura caotica a prevalente componente pelitica	0
rocce metamorfiche scistose a pelite dominante	0

Tabella 4-4: Velocità media di infiltrazione
(solo formazioni presenti nei sottobacini studiati)

4.4 APPLICAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO

Fiume Elsa

La sollecitazione pluviometrica che caratterizza il bacino di interesse è stata stimata sulla base delle curve di possibilità pluviometrica di stazioni incidenti sull'area di interesse o limitrofe, aggiornate al 2002 e fornite dal Servizio Idrologico della Regione Toscana. Le curve sono state stimate attraverso il metodo di regionalizzazione di adattamento della TCEV.

Con il metodo dei topoi [9-10] si è proceduto alla stima dell'altezza di pioggia per i vari tempi di ritorno a partire dalle curve delle seguenti stazioni:

COD	NOME	a	n	m	a₁	n₁	m₁
1300	S.ANDREA IN FABBRICA	20.967	0.262	0.174	19.874	0.384	0.18
1350	EMPOLI (PRUNECCHIO)	21.692	0.245	0.217	24.301	0.488	0.187
1410	POGGOBONSI (STROZZAVOLPE)	22.392	0.269	0.198	22.975	0.289	0.175
1420	S.GIMIGNANO	22.755	0.251	0.186	23.601	0.363	0.157
1430	CERTALDO	22.217	0.23	0.181	22.338	0.333	0.153
1450	CASTELFIORENTINO	22.013	0.271	0.229	24.077	0.36	0.188
1480	MELETO	23.854	0.351	0.178	27.727	0.435	0.167
1490	S. MINIATO (CIMITERO)	26.456	0.292	0.194	25.077	0.389	0.150
1500	FATTORIA SCALETTA	22.499	0.293	0.221	24.848	0.510	0.169
1680	LA MADONNINA	20.59	0.295	0.181	19.581	0.319	0.152
1740	CASTELFALFI	20.250	0.281	0.195	22.706	0.355	0.157
2634	MADONNA A BROLIO	25.188	0.275	0.198	26.412	0.329	0.148
2660	SIENA	19.955	0.345	0.201	19.862	0.325	0.18
2740	COTORNIANO (FATTORIA)	22.019	0.308	0.187	21.863	0.272	0.154

Tabella 4-5: Stazioni pluviometriche
 $(h = a_1 t^{n_1} Tr^{m_1}$ per $t < 1$ ora - $h = a t^n Tr^m$ per $t > 1$ ora)

All'altezza di pioggia stimata è stato applicato il coefficiente di ragguglio areale di tipo "globale", così come definito nei paragrafi precedenti [4-5].

Sulla base delle relazioni note tra le grandezze e i parametri morfologici e idrologici di cui ai paragrafi precedenti, sono stati stimati per i vari sottobacini considerati il tempo di ritardo caratteristico T_I [ore] e i parametri n [] e k [sec] del IUH di Nash [4-5].

Al fine di tener conto anche del contributo dei piccoli interbacini con reticolo idrografico non sufficientemente sviluppato da poter definire parametri attendibili (ordine di Horton-Strahler inferiore a 3), è stata adottata la seguente metodologia:

1. i sottobacini limitrofi sono stati accorpati in un unico interbacino a cui è stata assegnato il codice BAC seguito un numero progressivo da monte verso valle (vedi Tavola 1);
2. per ciascun interbacino BAC il parametro n [] di Nash è stato posto uguale al valore stimato per l'intero bacino del fiume Elsa;
3. il tempo di ritardo caratteristico T_I [ore] è stato stimato attraverso la regressione di potenza delle coppie $(A; T_I)$ dei sottobacini già calcolati con area inferiore a 30 Km², dove A [Km²] è l'area del bacino;
4. il parametro k [sec] è determinato dal rapporto T_I/n .

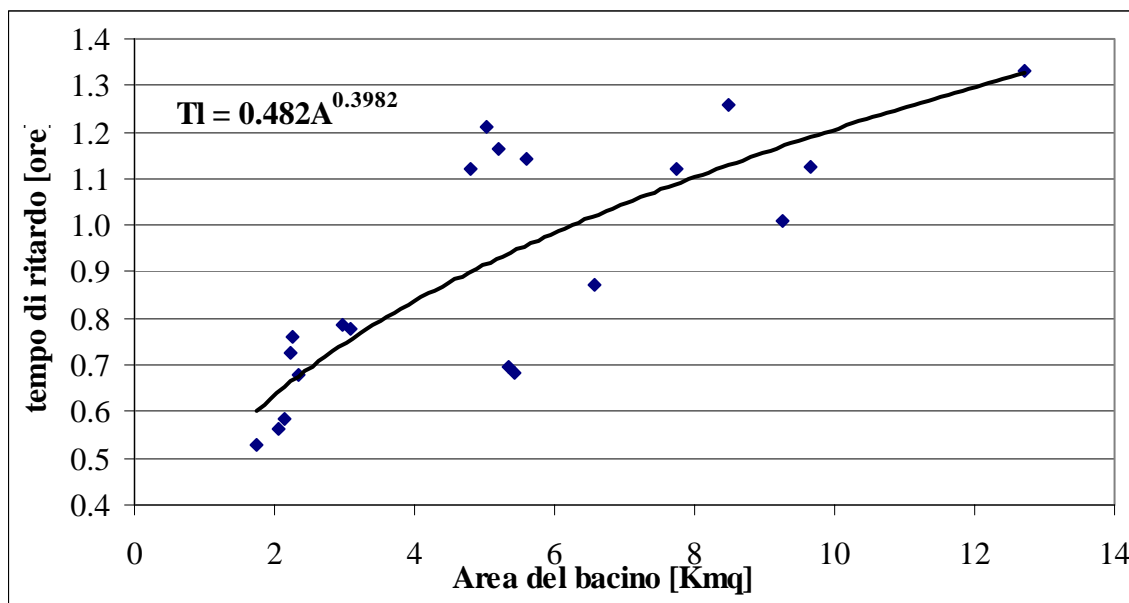


Figura 4-1: Regressione del tempo di ritardo caratteristico

Per il modello afflussi-deflussi, basato sulla perdita unitaria iniziale I_a [mm] e sulla velocità di infiltrazione K_s [mm/s], i relativi valori sono stati stimati tramite le procedure di regionalizzazione precedentemente descritte [4-5]. Per il calcolo della superficie boscata è stata acquisita la cartografia Corinne Land Cover; la Carta litologica disponibile presso dell'Autorità di Bacino ha permesso l'individuazione delle principali formazioni.

In questa sede sono state considerate durate di pioggia a intensità costante pari a **3, 6, 9, 12 ore** e tempo di ritorno di **20, 30, 100 e 200 anni**. Per ognuna delle combinazioni fra tempo di ritorno e durata di pioggia sono stati stimati gli idrogrammi in ingresso al modello idraulico dell'asta del fiume Elsa.

Nell'Allegato idrologico sono riportati i dati di input ed out della modellazione sopra descritta.

Reticolo secondario

Per la verifica degli affluenti del fiume Elsa, ad eccezione del Borro del Vicariato, l'analisi idrologica è stata condotta ricercando l'evento critico di ogni singolo bacino utilizzando il modello idrologico e dati sopra descritti. Al contrario di quanto fatto per il fiume Elsa, il coefficiente di ragguaglio delle precipitazioni è funzione soltanto dell'area del bacino considerato e della sua durata di pioggia critica (non è cioè stata scelta l'opzione "globale").

Gli idrogrammi relativi a ciascun bacino sotteso alla confluenza con il fiume Elsa costituiscono la sollecitazione di monte dei modelli idraulici implementati.

Per quanto riguarda il Borro del Vicariato, considerata la presenza di due casse di espansione su due porzioni equivalenti del bacino complessivo (Borro del Vicariato e Borro delle Forche), lo schema di simulazione prescelto è analogo a quello del fiume Elsa, con idrogramma in testa al tratto simulato idraulicamente ed immissioni laterali. Pertanto il coefficiente di ragguaglio areale è del tipo "globale" [4-5].

Inoltre, poiché l'interbacino a valle della confluenza del Borro delle Forche non ha un reticolo di scolo sufficientemente sviluppato da poter eseguire affidabile analisi idrologiche, il contributo di piena di tale aree è stato calcolato come differenza tra l'idrogramma dell'intero bacino del borro e la somma dei contributi idrologici (non laminati dalle casse) del Borro La Valle, del Borro delle Forche e del bacino di monte del Borro del Vicariato.

Per tutti gli affluenti sono stati simulati gli eventi con tempo di ritorno di **20, 30, 100 e 200 anni** e per le durate dell'evento meteorico a intensità costante sotto specificate. Si anticipa ad ogni modo che con l'analisi idraulica è stato verificato che gli eventi di durata superiore a quelle indicate per ciascun corso d'acqua risultano meno gravosi in termini di estensione delle aree allagabili.

Corso d'acqua	Durate di pioggia simulate [ore]
Fosso in loc. P.re Piano	0.8*
Borro dell'Inferno	1*
Borro della Zufola	0.6*
Torrente Agliena	3*
Borro del Vicariato	1*, 3, 6, 9, 12
Borro Corniola	0.9*, 3, 6

Tabella 4-6: durate di pioggia simulate
* = *durata critica*

Nell'Allegato idrologico sono riportati i dati di input ed out della modellazione sopra descritta.

5 Analisi idraulica

Definiti gli eventi di verifica si è proceduto all'implementazione della modellistica idraulica. I corsi d'acqua oggetto della modellazione idraulica sono i seguenti:

- Il Fiume Elsa è stato studiato per una lunghezza complessiva di quasi 24 km, con l'utilizzo di circa 160 sezioni, dalla confluenza con il Torrente Drove (Comune di Poggibonsi) fino allo scolmatore di Castelfiorentino. Esso presenta un andamento "irregolare" che potremmo definire subdendridico e in alcuni casi quasi meandriforme data la presenza di numerose anse per tutto il tratto di studio. A conferma di tale andamento planimetrico vi è la scarsa pendenza media del corso d'acqua che è pari a 0.17%.

Sono presenti otto ponti in corrispondenza delle sezioni 353.5, 341.5, 332.5, 330.5, 317.56, 312.5, 303.7, 298.6, 281.5 e due briglie (sez. 315.5 e sez. 287.5), l'ultima delle quali si trova in prossimità dell'abitato di Certaldo.

Tra i ponti sopra indicati sono presenti anche quelli della nuova variante S.R.T. 429 in corso di costruzione. Inoltre la modellazione idraulica delle aree allagabili ha tenuto conto del nuovo tracciato stradale in rilevato e delle relative connessioni idrauliche (tombini, sottopassi, viadotti, ecc.), così come riportate nel progetto definitivo approvato e in quello esecutivo. I relativi lavori risultano già appaltati.

- Il fosso in loc. P.re Piano è stato analizzato per circa 400 m con l'ausilio di 5 sezioni rilevate topograficamente, ivi compreso un tratto tombato di circa 140 m; la pendenza media è pari all'1.1%.
- Il Borro dell'Inferno è stato modellato per una lunghezza di circa 950 m fino all'immissione nel fiume Elsa utilizzando 10 sezioni con una pendenza media del fondo alveo dell'1%. Lungo il suo corso il Borro è attraversato da due ponti e presenta un tratto tombato lungo circa 395 m; a monte dell'area industriale Lupicaia una cassa di espansione in linea permette la laminazione delle piene.
- Il Borro della Zufola è stato studiato nel tratto terminale, fino alla confluenza con il fiume Elsa, per una lunghezza pari a circa 380 m. Sono presenti sei attraversamenti, tra cui il collettore fognario in prossimità della confluenza. La pendenza media è di circa il 2.2%.
- Il torrente Agliena è stato modellato per un tratto di circa 3.4 Km fino allo sbocco nel fiume Elsa con pendenza media del fondo dell'0.56%. Oltre alle circa 50 sezioni idrauliche rilevate, sono stati modellati sette ponti e una briglia.
- Il Borro del Vicariato è stato modellato per una lunghezza di circa 2.5 Km comprensivo della cassa di laminazione presente; sono stati considerati inoltre i contributi degli affluenti Borro La Valle e Borro delle Forche, modellati separatamente per determinare la portata laminata da eventuali esondazioni o dalla cassa in linea esistente sul secondo dei due tributari.
- Il Borro Corniola è stato modellato nel suo tratto terminale (pendenza media 0.5 %) per una lunghezza di 1150 m utilizzando 16 sezioni idrauliche e 2 attraversamenti.

I modelli idraulici sono stati implementati con il software Hec Ras 4.0.0 [11-12], di cui si riportano di seguito una breve descrizione. Nei successivi paragrafi sono inoltre presentati i dettagli delle scelte progettuali fatte e il set di dati utilizzati nella modellistica idraulica.

5.1 IL MODELLO IDRAULICO DI MOTO VARIO

Le simulazioni idrauliche in moto vario sono state condotte attraverso il programma di calcolo Hec-Ras [11-12] che, sulla base della discretizzazione numerica delle equazioni di moto, fornisce i livelli idrici in ciascuna sezione di calcolo tenendo conto delle eventuali transizioni tra corrente veloce e corrente lenta.

Il modello matematico di moto vario unidimensionale a fondo fisso risolve, in forma numerica, le equazioni di continuità e del moto per una corrente liquida in condizioni non stazionarie. Assumendo la gradualità spazio-temporale del fenomeno, la perdita di carico effettivo sono stimate con una delle equazione di moto uniforme disponibili (Manning o Gauckler-Strickler). Per includere nel modello gli effetti dissipativi indotti da variazioni di sezione, quali allargamenti o restringimenti, sono valutate le perdite di carico localizzate attraverso i coefficienti di contrazione ed espansione.

Al modello unidimensionale, capace di rappresentare adeguatamente il moto in alveo e in aree golenale di limitata dimensione, è accoppiato un sistema di celle di vaso secondo lo schema di Cunge: il modello matematico di moto vario simula i processi di trasferimento e

laminazione in alveo cui sono soggetti i volumi di piena durante il verificarsi degli eventi; l'accumulo dei volumi di esondazione nelle aree golenali più ampie o arginate viene invece studiato attraverso la definizione di celle caratterizzate da una propria legge d'invaso, che scambiano volumi d'acqua tra loro e con il corso d'acqua attraverso collegamenti schematizzati come soglie sfioranti libere o rigurgitate. Le celle di accumulo sono definite sulla base delle caratteristiche morfologiche del territorio in modo che lo schema di stramazzo in parete grossa possa essere considerato valido.

Per quelle aree golenali in cui, per le ridotte dimensioni trasversali, per la morfologia del piano campagna e per l'assenza di arginature, non appare adeguata una modellazione con celle di accumulo, è possibile definire, all'interno di ciascuna sezione idraulica, un'area attiva e una inattiva: la prima contribuente al deflusso, la seconda preposta all'accumulo temporaneo di volumi d'acqua. Il modello matematico di moto vario utilizza nell'equazione di continuità l'area totale e nell'equazione del moto la sola area attiva, con l'accorgimento di non considerare come perimetro bagnato la superficie di contatto tra i due tipi di area.

In corrispondenza dei ponti e per livelli idrici inferiori all'intradosso, il programma permette il calcolo con il metodo del bilancio energetico e con il teorema della quantità di moto. Il primo, basato sulla risoluzione delle suddette equazioni di continuità e del moto, sottrae nel calcolo dell'area liquida delle sezioni del ponte le parti occupate dalla struttura, ed aggiunge, nella determinazione del perimetro bagnato, le superficie del ponte in contatto con l'acqua.

Il teorema della quantità di moto, particolarmente appropriato in presenza di pile, applica l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Nel caso di livelli idrometrici che superino le quote di intradosso o di estradosso dei ponti, le simulazioni idrauliche dei ponti possono essere effettuati con il bilancio energetico o usando le equazioni di deflusso, libero o rigurgitato, per luce a battente e/o per luci sfioranti.

Per la simulazione delle condotte (opere di altezza limitata rispetto ai livelli idrometri attesi alla sezione di ingresso) Hec-Ras calcola l'energia necessaria a monte per avere una determinata portata attraverso l'opera, sia nei casi in cui la sezione di controllo si trovi all'ingresso (*inlet control*), sia quando detta sezione è posta all'uscita (*outlet control*).

Nel primo caso le equazioni adottate sono quelle emerse dai test di laboratorio effettuati dal NBS (1961) e BPR degli Stati Uniti, distinguendo i casi di imbocco sommerso e imbocco non sommerso. Nel secondo l'equazione di Bernoulli è applicata al fine di compiere un bilancio energetico fra le sezioni di imbocco e di uscita.

Tra le condizioni di inlet e outlet control è in generale quella che possiede il carico di monte più alto a determinare il tipo di moto all'interno della condotta per una data condizione di valle. Se, durante l'elaborazione, la domanda energetica del funzionamento in inlet control risulta maggiore di quella di outlet control, il programma valuta se le condizioni di controllo in ingresso possono effettivamente persistere attraverso il condotto senza porlo in pressione. Infatti, se questo funziona completamente in pressione, il programma adotta necessariamente il metodo di outlet control.

Il funzionamento idraulico di soglie e briglie in alveo è tenuto in conto attraverso l'adozione della legge di stramazzo in parete grossa, con coefficiente di efflusso definito dall'utente e variabile in funzione del grado di rigurgito determinato dai livelli di valle. Per un grado superiore al 95 % il programma risolve l'equazione del bilancio energetico abbandonando la formula dello stramazzo.

Relativamente a opere di regolazione mobili, quali ad esempio le paratoie piane previste nel presente progetto, il programma utilizza l'equazione di stramazzo in parete grossa qualora il carico idrico a monte della paratia sia inferiore alla luce della stessa. Per carichi superiori del 25 % della luce viene utilizzata l'equazione di luce a battente libera o rigurgitata. Nella fase transitoria si ha un graduale transizione tra le due formule.

Relativamente all'equazione di luce battente libero o rigurgita, la prima è utilizzata fino ad una rapporto tra carico di valle e carico di monte inferiore al 67%, la seconda per un rapporto superiore all'80%; tra i due valori si ha un graduale transizione tra le due formule.

Per la risoluzione del sistema di equazioni è necessario conoscere le condizioni al contorno sia a monte che a valle. Le prime sono imposte attraverso un idrogramma di livelli/portate. Le seconde possono invece essere costituite da un idrogramma dei livelli/portate o da una scala di deflusso.

Per maggiori dettagli sul modello di calcolo e sulle equazioni utilizzate si rimanda ai manuali del programma Hec-Ras [11-12].

5.2 VERIFICHE IDRAULICHE DELLO STATO ATTUALE

5.2.1 ASPETTI GENERALI

I modelli idraulici sono stati implementati attraverso la definizione di uno schema geometrico del sistema idraulico (sezioni fluviali, aree allagabili, ecc.), la stima di parametri idraulici (coefficienti medi di resistenza al moto, coefficienti di stramazzo, ecc.), la scelta di condizioni iniziali e al contorno e di sollecitazioni del sistema (idrogrammi di verifica).

Si riportano di seguito la descrizione della metodologia di caratterizzazione geometrica e i coefficienti idraulici utilizzati comuni a tutti i modelli implementati. Le singole peculiari di ciascun corso d'acqua saranno invece esposte nei successivi paragrafi.

La caratterizzazione della capacità di invaso statico o di propagazione delle piene delle aree contermini al corso d'acqua è stata preceduta da un'attenta analisi delle caratteristiche e delle opere sul territorio su base cartografica e attraverso sopralluoghi diretti.

Fatto salvo il caso in cui tali aree siano d'ampiezza confrontabile con quella dell'alveo attivo e non protette da strutture idrauliche di contenimento, situazione che permette di assumere in ogni istante come quota d'inondazione quella idrometrica in alveo (aree attive o inattive in funzione della dinamica locale), le aree dove è stato valutato prevalente il fenomeno di accumulo dei volumi di esondazione e dove la velocità della corrente può essere giustificatamente considerata prossima a zero, sono state approssimate come Aree di Potenziale Esondazione (APE), la cui caratterizzazione è stata condotta secondo i seguenti criteri:

- individuazione delle aree di potenziale esondazione: tale operazione è stata eseguita integrando le aree già individuate nell'ambito dello Studio di area vasta [13] e dei progetti definitivo ed esecutivo della variante alla S.R.T. 429 [14-15] con le evidenze del territorio, la cartografica in scala 1:2.000 e il rilievo laser-scanning con celle 1x1;
- caratterizzazione morfologica delle aree di potenziale esondazione: in tale fase si è proceduto alla definizione delle leggi d'invaso volumi-quote d'inondazione $V=V(H)$ prendendo come base cartografica il rilievo laser-scanning;
- definizione delle connessioni idrauliche: sulla base di quanto ottenuto nelle fasi precedenti e dell'analisi dettagliata delle caratteristiche morfologiche,

infrastrutturali e idrauliche del territorio sono state definite le connessioni idrauliche tra l'alveo principale e le celle di potenziale esondazione, e tra le stesse celle.

Come anticipato nei paragrafi precedenti la variante alla S.R.T. 429 [13], realizzata sia in rilavato che in viadotto, è stata considerata nella schematizzazione idraulica, comprendendo anche le connessioni idrauliche (tombini, scatolari, ecc.) previste nel progetto definitivo e in quello esecutivo. I relativi lavori risultano già appaltati.

La quota di sfioro per le connessioni idrauliche alveo/cella è definita come la quota di sommità dell'argine ricavata dalle sezioni rilevate e dal rilievo topografico messo a disposizione dal Comune di Certaldo. Per le connessioni cella/cella tale quota è individuata dal profilo di contenimento fra le celle.

La larghezza del fronte di sfioro per gli sfioratori d'alveo è stata fissata sulla base delle attuali conoscenze dei fenomeni di esondazione, in funzione della densità spaziale delle sezioni fluviali, nonché della loro estensione. Per gli sfioratori cella/cella, la lunghezza della soglia è stata fissata pari alla lunghezza del tratto di contatto, salvo casi particolari rappresentati da sottopassi, tombature e zone ristrette in cui viene assunta la larghezza effettiva della luce.

Il coefficiente di efflusso per il calcolo delle portate delle connessioni idrauliche alveo/cella e cella/cella sono stati impostati secondo la seguente tabella:

Tipologia		Coeff. efflusso
Rilevati arginali o opere idrauliche in c.a.	alveo/cella	0.25
Rilevati stradali, ferroviari, ecc.		0.25
Cigli di sponda non arginati		0.12
Rilevati stradali, ferroviari, ecc.	cella/cella	0.25
Limiti morfologici naturali		0.12

Tabella 5-1: Coefficienti di efflusso per le connessioni idrauliche laterali

Nelle tavole allegare sono individuati i perimetri delle aree di potenziale esondazione e sono simbolicamente indicate le connessioni cella/cella.

I coefficienti di contrazione ed espansione, necessari per la valutazione delle perdite di carico indotte da variazioni di sezione, allargamenti o restringimenti, sono stati imposti pari rispettivamente a 0.1 e 0.3 secondo le indicazioni di letteratura [6-7-8-10-11-12].

Il coefficiente di efflusso da utilizzare nella formula di stramazzone in parete grosso per le briglie trasversali è stato posto uguale a 0.32 [6-7-8-10-11-12].

Prima di procedere alla presentazione dei singoli modelli idraulici implementati, appare utile anticipare alcune considerazioni generali sulla scelta della condizioni di valle degli affluenti del fiume Elsa. Questi infatti scorrono attraverso la pianura alluvionale del fiume principale e vi si immettono, ad esclusione del Borro del Vicariato, senza nessun organo di regolazione (clapet, saracinesche, paratoie, ecc.) o attraverso discontinuità arginali (mancanza dell'argine in corrispondenza della confluenza). Conseguentemente i volumi di piena del fiume Elsa hanno la

possibilità, attraverso tali discontinuità nelle opere di difesa, di espandersi nelle stesse aree golenali attraversate dagli affluenti.

In ragione di tali considerazioni, verificato a posteriori che i battenti di piena del fiume Elsa risultano generalmente maggiori rispetto a quelli degli eventi critici sugli affluenti e ai fini di perimetrare le aree allagabili dai singoli corsi d'acqua tributari, è stato scelto di utilizzare come condizioni al contorno i livelli di piena ordinaria del fiume Elsa o condizioni di moto uniforme.

Per le considerazioni e le scelte effettuate sul Borro del Vicariato si rimanda allo specifico paragrafo.

5.2.2 FIUME ELSA

L'analisi idraulica del fiume Elsa è stata condotta per i tempi di ritorno 20 – 30 – 100 – 200 e per durate dell'evento meteorico pari a 3, 6, 9 e 12 ore che risultano critiche nei vari tratti dell'asta fluviale.

Per ciascuno scenario di verifica il modello idraulico è stato cimentato con gli idrogrammi stimati secondo la procedura descritta nei paragrafi precedenti. E' inoltre stata fatta l'ipotesi che tutti i contributi idrologici stimati affluiscano nel fiume Elsa, trascurando pertanto le eventuali esondazioni degli affluenti determinate o dall'insufficiente officiosità idraulica degli stessi o dalla chiusura di clapet e portelle necessari per contenere il rigurgito del corso d'acqua principale.

Situazione particolare è quella tra le sezioni 267 e 268, dove il muro d'argine in destra è interrotto per consentire il passaggio alla golena interna ai mezzi di manutenzione: il varco è dotato di gargami per permettere la chiusura con panconature da parte della Protezione Civile Comunale in ottemperanza al protocollo approvato. Il Comune di Certaldo, nell'ambito della procedura di cui all'art. 32 del PAI provvederà ad allegare alla presente documentazione il suddetto protocollo. Pertanto, ai fine dell'individuazione della pericolosità idraulica sul territorio, è stato ipotizzato che la continuità idraulica sia in ogni momento garantita dal tempestivo intervento di chiusura.

Come condizione al contorno di valle è stato impostato un idrogramma dei livelli stimato attraverso l'estensione di modello idraulico a valle. Si precisa ad ogni modo che è stato verificato che i livelli calcolati sul territorio comunale di Certaldo risultano totalmente indipendenti dalla condizione di valle prescelta in quanto la sezione di chiusura del modello è sufficientemente lontana dall'area di interesse.

I rilievi delle sezioni del fiume Elsa nel tratto compreso tra la confluenza con il torrente Pesciola e lo scolmatore di Castelfiorentino sono stati forniti dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno e sono stati eseguiti prima del 1998. Quelli del tratto compreso tra le confluenze del torrente Pesciola e del torrente Agliena sono state effettuati dal Geom. Lapi di Stingea nel 2003 su incarico del Circondario Empolese Valdelsa finalizzato allo studio di area vasta [13]. Infine, per le sezioni del tratto compreso tra Poggibonsi e la confluenza del torrente Agliena sono stati acquisiti i dati di RFI (Rete Ferroviaria Italiana) rilevati per il progetto di raddoppio della linea ferroviaria Poggibonsi – Certaldo (rilievo del 2003).

In corrispondenza dei nuovi ponti della variante alla S.R.T. 429 sono state utilizzate le sezioni di progetto definite nell'ambito del progetto esecutivo della strada (2009) [15].

Ad integrazione del rilievo di RFI, nel 2008 il Comune di Certaldo ha fatto rilevare sul Fiume Elsa 2 sezioni in località Mulinaccio (sez. 253.3 - 253.7) e 3 sezioni in località San Benedetto Basso (sez. 299.5 – 299.7 – 298.09); infine ulteriori 14 sezioni del Fiume Elsa sono state fatte

eseguire dalla Provincia di Siena nel 2004 tra il ponte di Poggibonsi e la località Casa Nova del Piano in nel Comune di Poggibonsi.

I coefficienti medi di resistenza al moto nelle varie sezioni sono stati stimati negli studi idraulici a supporto del progetto approvato della variante alla S.R.T. 429 [14]. In particolare le sezioni d'alveo sono caratterizzate da un coefficiente medio di resistenza secondo Manning (n) di $0.037 \text{ s/m}^{1/3}$, mentre per le aree golenali di $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$. Sulla base dei dati di letteratura [6] e la conoscenza diretta dei luoghi si condividono i coefficienti che sono pertanto stati utilizzati anche nel presente studio.

5.2.3 FOSSO IN LOC. PODERE IL PIANO

Per il fosso in loc. P.re Piano è stata condotta un'analisi in moto permanente viste le ridotte dimensioni del corso d'acqua. È stato assunto un coefficiente medio di resistenza al moto pari a $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$. Le sezioni sono state rilevate per il Comune dal Geom. Migliorini nel 2008.

Il fosso è stato verificato per le portate critiche relative ai tempi di ritorno 20 – 30 -100 - 200 anni.

Come condizione al contorno di monte è stato posto il livello di moto uniforme per le varie portate di verifica, mentre alla confluenza con il fiume Elsa è stato fissato il livello di 70.5 m slm. Ad ogni modo in corrispondenza dell'argine longitudinale al corso d'acqua ricettore è presente un manufatto a bocca tarata con luce di dimensioni 0.75 x 1.20 m che rigurgita le portate di piena del fosso.

5.2.4 BORRO DELL'INFERNO

L'analisi idraulica del Borro dell'Inferno è stata condotta in moto vario con celle di accumulo secondo lo schema di Cunge [3] per l'evento critico relativo ai tempi di ritorno 20 – 30 -100 - 200 anni. La condizione al contorno di valle corrisponde al livello idrico costante di 68 m s.l.m.

I valori del coefficiente di Manning scelti sono compresi tra 0.025 e $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$ in funzione delle condizioni dei singoli tratti d'alveo: $0.025 \text{ s/m}^{1/3}$ per il tratto tombato, $0.033 \text{ s/m}^{1/3}$ subito a valle della ferrovia e $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$ nel tratto terminale.

Le sezioni utilizzate nella modellazione del corso d'acqua sono state rilevate nel 2003 da RFI (Rete Ferroviaria Italiana) per il progetto di raddoppio della linea ferroviaria Poggibonsi - Certaldo. Il ponte ferroviario e quello immediatamente a valle sono stati rilevati nel 2008 dal Geom. Migliorini.

La capacità di invaso della cassa di espansione a monte dell'area industriale Lupicaia è stata stimata sulla base della cartografia tecnica 1:2.000 e del progetto esecutivo dell'opera.

5.2.5 BORRO DELLA ZUFOLA

Il Borro della Zufola è stato verificato per le portate critiche relative ai tempi di ritorno 20 – 30 -100 - 200 anni con un modello di moto vario accoppiato con celle di accumulo. Le condizioni al contorno è pari ai livelli idrico costante di 66 m slm.

I valori utilizzati dei coefficienti medi di resistenza al moto (Manning) sono $0.025 \text{ s/m}^{1/3}$ per i tratti di alveo con rivestimento in calcestruzzo, $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$ e $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ per l'alveo inciso rispettivamente a monte e a valle della vecchia S.R.T. 429. Le aree esterne all'alveo ma comunque contribuenti al deflusso di piena sono state caratterizzate con un coefficiente di $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$.

Le sezioni utilizzate nella modellazione del corso d'acqua sono state rilevate nel 2003 da RFI (Rete Ferroviaria Italiana) per il progetto di raddoppio della linea ferroviaria Poggibonsi - Certaldo. Il tombino sulla vecchia S.R.T. 429 è stato rilevato nel 2008 dal Geom. Migliorini.

5.2.6 TORRENTE AGLIENA

Il modello idraulico in moto vario con celle di accumulo implementato per il torrente Agliena è stato cimentato con gli idrogrammi critici per i tempi di ritorno 20 – 30 – 100 – 200 anni. La condizioni al contorno di valle è pari al livelli idrico costante di 63.90 m slm.

Le sezioni utilizzate sono state rilevate dal Geom. Lapi di Stingea nel 2003 su incarico del Circondario Empolese Valdelsa finalizzato allo studio di area vasta del bacino del fiume Elsa. Sono successivamente state integrate nel 2008 con un rilievo del Geom. Migliorini.

In funzione della densità di copertura vegetale delle sponde è stato scelto un coefficiente di Manning di $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$ per il tratto a monte della vecchia S.R.T. 429; nel tratto che attraversa l'abitato di Certaldo, considerata la presenza di solo inerbimento e visto lo stato di manutenzione dell'alveo, è stato utilizzato un coefficiente di $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$.

5.2.7 BORRO DEL VICARIATO

Le simulazioni idrauliche per la definizione della pericolosità nel bacino del Borro del Vicariato hanno riguardato sia l'asta principale che i tributari Borro La Valle e Borro delle Forche. Sono inoltre state modellate le casse di espansione esistenti sul Borro del Vicariato e sul Borro delle Forche, di cui la seconda ultimata e la prima in attesa di realizzazione della bocca tarata. Si precisa ad ogni modo che le simulazioni condotte hanno tenuto in considerazione esclusivamente delle opere esistenti.

Le curve d'invaso delle due casse di espansione sono state stimate dai dati acquisiti dai relativi progetti e dalla cartografia in scala 1:2.000.

Le sezioni del Borro La Valle e il ponte ferroviario sono stati rilevati dal Geom. Migliorini nel 2008, mentre le sezioni delle altre due aste fluviali sono state fornite dal Comune e realizzate nell'ambito della progettazione ed esecuzione degli interventi di risagomatura, adeguamento e laminazione lungo il corso d'acqua.

In funzione delle caratteristiche di scabrezza del fondo e delle sponde, i valori del coefficiente di Manning utilizzati sono:

- $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ per il Borro del Vicariato tra la cassa di espansione e la confluenza del Borro La Valle;
- $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$ per il Borro del Vicariato tra la confluenza del Borro La Valle e il ponte ferroviario;
- $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ per il Borro del Vicariato tra il ponte ferroviario e la confluenza con il fiume Elsa;
- $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$ per il Borro delle Forche;
- $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ per il Borro La Valle.

Le simulazioni in moto vario con celle di accumulo sono state condotte per i tempi di ritorno 20 – 30 – 100- 200 anni, rispettivamente per le durate 1, 3, 6, 9 e 12 ore, sia sull'asta principale che sugli affluenti: per ciascun evento considerato, gli idrogrammi derivanti dalle simulazioni

del Borro delle Forche (con cassa di espansione), del Borro La Valle e il contributo idrologico del sottobacino di valle sono stati sommati a quello del Borro del Vicariato laminato dalla propria cassa di espansione.

A differenza degli altri corsi d'acqua secondari analizzati, la necessità di verificare, oltre alla portata critica del borro, un più ampio spettro di durate di eventi di pioggia nasce dalla presenza di una bocca tarata con clapet in corrispondenza dell'argine longitudinale al fiume Elsa: all'aumentare dei livelli idrici di quest'ultimo, il Borro del Vicariato viene rigurgitato fino ad avere il deflusso completamente impedito allorché i livelli nel fiume superano le quote di contenimento del borro (circa 60.30 m slm); in tale circostanza le acque tracimano nella pianura circostante e aggravano le condizioni di rischio derivante dal solo fiume Elsa. Per quanto sopra illustrato è stato ritenuto necessario verificare il Borro del Vicariato, oltre che per le massime portate temibili (portate critiche), anche per eventi di durata e volume di piena maggiori.

Coerentemente con tale impostazione, a parità di durata e tempo di ritorno dell'evento è stato posto come condizione al contorno di valle l'idrogramma dei livelli del fiume Elsa in corrispondenza della confluenza con il Borro del Vicariato.

5.2.8 BORRO CORNIOLA

L'analisi idraulica del Borro Corniola è stata condotta in moto vario con celle di accumulo nelle aree golenali per i tempi di ritorno 20 – 30 -100 - 200 anni e durate dell'evento di pioggia di 0.9 (evento critico), 3 e 6 ore. Condizioni di moto uniforme sono state imposte nella sezioni di confluenza con il fiume Elsa.

E' stato assunto un coefficiente medio di resistenza al moto (Manning) pari a $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$.

Le sezioni sono state rilevate per il Comune dal Geom. Migliorini nel 2008.

6 Analisi dei risultati

La valutazione dei risultati ottenuti dalle simulazione numeriche nelle attuali condizioni di assetto idraulico dei corsi d'acqua ha portato alle considerazioni e all'individuazione delle criticità di seguito riportate.

Nelle tavole allegate sono indicate le aree soggette ad allagamento per i vari tempi di ritorno e con riferimento alla quote del modello digitale del terreno cluster 1x1, ove disponibile, e della cartografia tecnica 1:2.000 e 1:10.000 altrove; sono inoltre indicate le pericolosità così come definite dal Piano di Assetto Idrogeologico e dal D.P.G.R.T. 26/R/2007.

6.1 FIUME ELSA

Con riferimento alle sole aree interessate dalle nuove previsioni urbanistiche indicate dal Comune, si rileva il sormonto dell'argine destro in prossimità delle sezioni 291 e 289; i volumi di piena vanno ad interessare l'area degli impianti sportivi con livello massimo di 66.80 m slm e un volume complessivo di circa 250.000 mc.

Rischio di sormonto arginale per la piena duecentennale emerge anche in destra idraulica a valle della confluenza del torrente Agliena. In questo caso i volumi si distribuiscono nell'ansa del fiume in località P.re La Lame (livello idrico di 64.10 m slm) fino ad oltrepassare la ferrovia attraverso il sottopasso stradale. Il volume complessivo esondato è di circa 275.000 mc.

6.2 FOSSO IN LOC. PODERE IL PIANO

Il tombino di attraversamento della vecchia strada S.R.T. 429 risulta insufficiente e pertanto i deflussi di piena, rigurgitati a monte, defluiscono verso valle attraverso il piano viario della strada.

6.3 BORRO DELL'INFERNO

La cassa di espansione contribuisce in modo determinante al completo affrancamento dell'area industriale Lupicaia e dell'area a valle della ferrovia dal rischio idraulico del borro. Si rileva che il franco dell'argine della cassa sui massimi livelli di piena duecentennale appare inferiore a quello normalmente richiesto (1 m).

6.4 BORRO DELLA ZUFOLA

Si rileva l'insufficienza di quasi tutti gli attraversamenti a monte della ferrovia anche per il tempo di ritorno ventennale, con conseguente allagamento delle aree circostanti.

6.5 TORRENTE AGLIENA

Si verificano esondazioni a partire dal tempo di ritorno di 20 anni nelle aree agricole a monte di Certaldo. A monte del ponte della vecchia S.R.T. 429, tra le sezioni 22 e 21 le esondazioni interessano una porzione dell'abitato. A valle anche i livelli di piena duecentennale risultano completamente contenuti tra gli argini.

6.6 BORRO DEL VICARIATO

L'asta principale del Borro a monte della circonvallazione risulta in condizioni di sicurezza idraulica per il tempo di ritorno 200 anni, ad eccezione di marginali allagamenti in prossimità della località Casotti e della ferrovia. Il tratto a valle risulta invece insufficiente già per il tempo di ritorno di 20 anni.

A valle della ferrovia, a causa dell'intermittenza di scolo determinata dal clapet in corrispondenza dell'argine del fiume Elsa, si verificano esondazioni a partire dal tempo di ritorno 20 anni; i flussi quindi si propagano parallelamente al fiume Elsa fino al Borro Casanova.

Per l'insufficienza del tombino finale del Borro La Valle (il tombino risulta per circa metà interrato in quanto il fondo è ubicato a quota inferiore rispetto al thalweg del corpo idrico ricettore), i deflussi centennali invadono la sede stradale Certaldo-Lungagnana e si propagano lungo la viabilità esistente fino alla zona industriale in località Il Barnino (volume circa 1000 mc).

6.7 BORRO CORNIOLA

Circa 200 m a monte del ponte sulla vecchia S.R.T. 429 si verificano intense esondazioni in destra e sinistra idraulica che riducono fortemente la portata in alveo. Le acque quindi si propagano verso valle fino al sottopasso della ferrovia.

7 Condizioni di fattibilità degli interventi

La pericolosità idraulica individuata nei precedenti paragrafi per le aree oggetto di trasformazione urbanistica previste nel Regolamento Urbanistico determina la necessità di individuare condizioni di fattibilità per garantire:

1. la sicurezza idraulica rispetto ai livelli di piena duecentennale calcolati, con franco minimo di 0,5 m;
2. il non aggravio del rischio nelle aree contermini a quelle di intervento attraverso il compenso dei volumi sottratti all'attuale laminazione del fiume Elsa e dei suoi affluenti.

Nella seguente tabella sono indicate le suddette condizioni di fattibilità per ogni previsione interessata da pericolosità idraulica o al limite delle aree perimetrate. Sono pertanto da prescrivere le seguenti quote di sicurezza e volumi da compensare.

Codice	UTOE	Quota di sicurezza [m slm]	Volume compenso [mc]	Note
B.COM.2	12	67.30	-	
C.1	10	72.75	-	Necessità di regimazione del reticolo minore di drenaggio
B.sat.3	12	66.75	-	
C.urb.1.4	13	62.30	2800	
B.comp.3	11	64.10	320	
B.sat.2	12	65.80	-	
RU.18	12	65.60	630	
D.3.1	14	59.10	19600	Il volume indicato è quello massimo da recuperare. A livello di piano attuativo potranno essere presentati approfondimenti in funzione dell'estensione ed ubicazione delle aree a verde.
RU.4.de	5	75.75	60/4150	Il volume di compenso per il rialzamento della sola area di parcheggio è di 60 mc. In alternativa, la chiusura idraulica lungo via del Ponte Vecchio garantirebbe la messa in sicurezza anche dell'abitato esistente; in questo secondo caso dovranno essere recuperati 4150 mc

8 Conclusioni

Nel presente studio sono state eseguite le stime degli idrogrammi di piena e le verifiche idrauliche dei corsi d'acqua che attraversano il territorio del Comune di Certaldo. Sono stati presi in considerazione il fiume Elsa, il Borro in località P.re Piano, il Borro dell'Inferno, il Borro della Zufola, il torrente Agliena, il Borro del Vicariato e i suoi affluenti, il Borro Corniola. Gli altri corsi d'acqua potenzialmente pericolosi (torrente Avane, torrente Avanella, Borro della

Giuncaia, Borro Casanova) sono stati presi in considerazione da altri studi disponibili presso il Comune.

Stimate le portate e i livelli idrici nei corsi d'acqua e nelle aree contermini per i tempi di ritorno 20, 30, 100 e 200 anni, si è proceduto alla perimetrazione delle aree allagabili e delle pericolosità ai sensi del D.P.G.R.T. 26/R/2007 e del P.A.I.. Valutato quindi la necessità di condizionare alcuni interventi alla realizzazione di interventi di messa in sicurezza idraulica e compenso dei volumi sottratti alla naturale laminazione delle piene, sono stati definiti le quote di sicurezza e gli interventi necessari a garantire il non aggravio del rischio idraulico in attuazione della vigente normativa.

Bibliografia

- [1] **Autorità di Bacino del Fiume Arno**, Piano di Bacino del Fiume Arno, Rischio idraulico, Sintesi del Progetto di Piano Stralcio, 5, luglio 1996.
- [2] **Autorità di Bacino del F. Arno**, Perimetrazione delle aree a rischio sull'asta principale del fiume Arno e sugli affluenti nel tratto di rigurgito, Firenze, 1999.
- [3] **Autorità di Bacino del Fiume Arno**, "Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)", Firenze, Maggio 2002
- [4] **Regione Toscana**, Regionalizzazione delle portate di piena in Toscana, a cura del PIN-Centro Studi Ingegneria Prato, Prato, 1998.
- [5] **Regione Toscana**, Aggiornamento e sviluppo del sistema di regionalizzazione delle portate di piena in Toscana, a cura del PIN-Centro Studi Ingegneria Prato, Prato, 2003.
- [6] **Chow V.T.**, Open Channel Hydraulics, McGraw Hill, New York, 1959.
- [7] **Marchi – Rubatta**, Meccanica dei fluidi – Principi e applicazioni idrauliche, UTET, 1981.
- [8] **Rossi e Salvi**, Manuale dell'Ingegnere Civile, Zanichelli, 1996.
- [9] **Maione**, Le piene fluviali, La Goliardica Pavese, Pavia, 1995
- [10] **Da Deppo, Datei, Saladin**, Sistemazione dei corsi d'acqua, Libreria Cortina, Padova, 2000
- [11] **Hydrologic Engineering Center**, HEC-RAS: River Analysis System , User's Manual, Version 3.1, U.S. Army Corps of Engineering, 2001.
- [12] **Hydrologic Engineering Center**, HEC-RAS: River Analysis System , Hydraulic Reference Manual, Version 3.1, U.S. Army Corps of Engineering, 2001
- [13] **Studio di area vasta nel bacino del fiume Elsa**, Circondario Empolese Valdelsa, 2004
- [14] **S.R. 429 di Val d'Elsa – Progetto definitivo**, Provincia di Siena, 2005
- [15] **S.R. 429 di Val d'Elsa – Progetto esecutivo**, Provincia di Siena, 2009