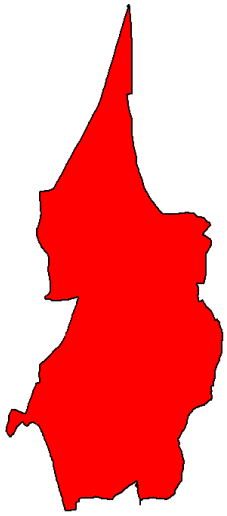
REGIONE TOSCANA

STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO FINALIZZATO
AL RIESAME DELLE MAPPE DI PERICOLOSITA' DA ALLUVIONE
DEL COMUNE DI BIENTINA
AI SENSI DELL'ART. 20 COMMA 1 DELLA LEGGE REGIONALE 41/2018

R.1 – RELAZIONE IDROLOGICO-IDRAULICA

Comune di Bientina



Il Committente:	Il Tecnico:	Data:
Comune di Bientina	Ing. Alessio Gabbrielli	Settembre 2020

INDICE

1. Premessa generale 2
2. Considerazioni tecniche preliminari 3
2.1 Pericolosità idraulica attuale e normativa di riferimento 3
2.2 Approccio metodologico degli studi precedenti 8
2.3 Obiettivi e metodologia di indagine del nuovo studio 11
2.4 Articolazione del lavoro 14
3. Inquadramento generale dell'area di studio 15
3.1 Il Padule ed il Canale Emissario Bientina 15
3.2 Il reticolo idrografico 18
3.3 Il drenaggio delle aree urbane 25
4. Idrologia: il "modello Padule" 26
4.1 Approccio metodologico 26
4.1.1 Premessa 26
4.1.2 Il metodo di calcolo 28
4.2 Modello idrologico del Padule e del Canale Emissario Bientina 44
4.2.1 Parametri del modello 44
4.2.2 Risultati del modello e considerazioni 49
5. Idraulica: il "modello Padule" 54
5.1 Modello del Padule e del Canale Emissario Bientina: approccio metodologico 54
5.1.1 Modellistica monodimensionale Mike Hydro River 55
5.1.2 Modellistica bidimensionale Mike 21 59
5.1.3 Modellistica monodimensionale-bidimensionale accoppiata Mike Flood 61
5.2 Geometria del modello idraulico 62
5.2.1 Le sezioni idrauliche 62
5.2.2 La base bidimensionale 65
5.2.3 I link bidirezionali 68
5.3 Condizione di valle: la "Botte" 69
5.4 Input idrologici e condizioni iniziali 71
5.5 Risultati della modellazione 75
5.6 Modello idraulico per condizioni di valle "modello Bientina" 78
6. Idrologia: il "modello Bientina" 81
7. Idraulica: il "modello Bientina" 91
7.1 Modello idraulico degli affluenti sinistri del Canale Emissario Bientina 91
7.2 Considerazioni sui risultati della modellazione 97
8. Mappe della pericolosità da alluvione, battenti, velocità e magnitudo idraulica 99

1. PREMESSA GENERALE

Il presente studio è redatto per conto del Comune di Bientina ed ha ad oggetto le verifiche idrologiche ed idrauliche ai sensi della L.R. 41/2018 finalizzate all'aggiornamento del Quadro Conoscitivo inerente agli aspetti idraulici sul territorio comunale. Questo studio anticipa infatti la redazione del Piano Operativo comunale, a supporto del quale il Comune propone il riesame delle mappe di pericolosità da alluvione, come previsto dall'art. 20 comma 1 della L.R. 41/2018.

Il Comune di Bientina, incaricando lo scrivente professionista, già redattore degli studi idrologico-idraulici di supporto al Regolamento Urbanistico comunale approvato con D.C.C. n. 43 del 08/08/2009, propone con il presente lavoro la completa revisione delle mappe di pericolosità da alluvione, che attualmente derivano proprio dagli studi del 2009.

A differenza del precedente, questo studio prende in esame tutto il reticolo idrografico insistente sul territorio comunale, con particolare riferimento ai corsi d'acqua del fondovalle.

E' proposta una nuova modellazione idrologica ed idraulica del Canale Emissario Bientina, di cui è stata completamente aggiornata la modellistica idrologica mediante un approccio diverso e di maggior dettaglio, nonché approfondita l'analisi del reticolo di pianura, ponendo specifica attenzione ai corsi d'acqua interferenti con le aree urbanizzate.

Il presente lavoro è stato svolto fin da principio condividendo strategie e metodologie di indagine con gli Enti preposti (Regione Toscana e Distretto Appennino Settentrionale).

Per la complessità di analisi, soprattutto del sistema idraulico del Padule e del Canale Emissario Bientina, sono stati svolti numerosi incontri di coordinamento con i tecnici degli Enti suddetti, a partire dal Luglio 2018, per un continuo aggiornamento degli sviluppi del lavoro; durante questo percorso sono sempre state accolte le indicazioni ricevute, ed implementati approfondimenti e modifiche in corso d'opera.

Attraverso questo studio il Comune di Bientina si dota di nuove mappe della pericolosità da alluvione, ai sensi del D.Lgs. 49/2010, nonché di nuove mappe di battenti, velocità e magnitudo idraulica, come richiesto dalla L.R. 41/2018.

La presente relazione integra e sostituisce la precedente, datata Marzo 2020, trasmessa alla Regione Toscana con note n. 3376 del 31/03/2020 e n. 3388 del 01/04/2020.

Essa contiene risposta alla richiesta di integrazioni di cui alla nota della Regione Toscana, Settore Genio Civile Valdarno Inferiore, assunta dal Comune di Bientina a prot. n. 0003753/2020 in data 09/04/2020; le modifiche si limitano ad i capitoli 6, 7 e 8, e sono racchiuse entro paragrafi indicati con la dicitura MODIFICHE ED INTEGRAZIONI.

Contestualmente sono modificati ed integrati anche alcuni degli elaborati grafici precedentemente presentati.

2. CONSIDERAZIONI TECNICHE PRELIMINARI

Prima di affrontare la complessa trattazione del lavoro svolto appare necessario effettuare alcune preliminari considerazioni al fine di rapportare quanto di seguito illustrato ai criteri di indagine che hanno caratterizzato gli studi precedenti, di specificare le novità normative sopravvenute negli ultimi anni e quindi di chiarire i principi che hanno condotto all'adozione di una particolare metodologia di indagine, ritenuta appropriata per cercare di riprodurre con buona affidabilità il comportamento idrologico ed idraulico di un sistema idrografico assai articolato come quello del Padule di Bientina e dei principali corsi d'acqua che vi appartengono.

Come nel 2009, anche oggi il Comune di Bientina si fa carico di uno studio che a livello di complessità e di estensione territoriale trascende ampiamente i confini comunali, producendo risultati ed informazioni di valore generale, e di notevole interesse anche per i territori comunali adiacenti.

2.1 Pericolosità idraulica attuale e normativa di riferimento

La definizione della pericolosità idraulica che attualmente caratterizza il territorio comunale di Bientina risale, come anticipato, agli studi di supporto al Regolamento Urbanistico comunale, e contestuale variante al Piano Strutturale, del 2009; tali studi sono stati redatti ai sensi del D.P.G.R. 26R/2007 allora vigente.

Di seguito sono mostrati tre estratti della carta di pericolosità del Piano Strutturale.

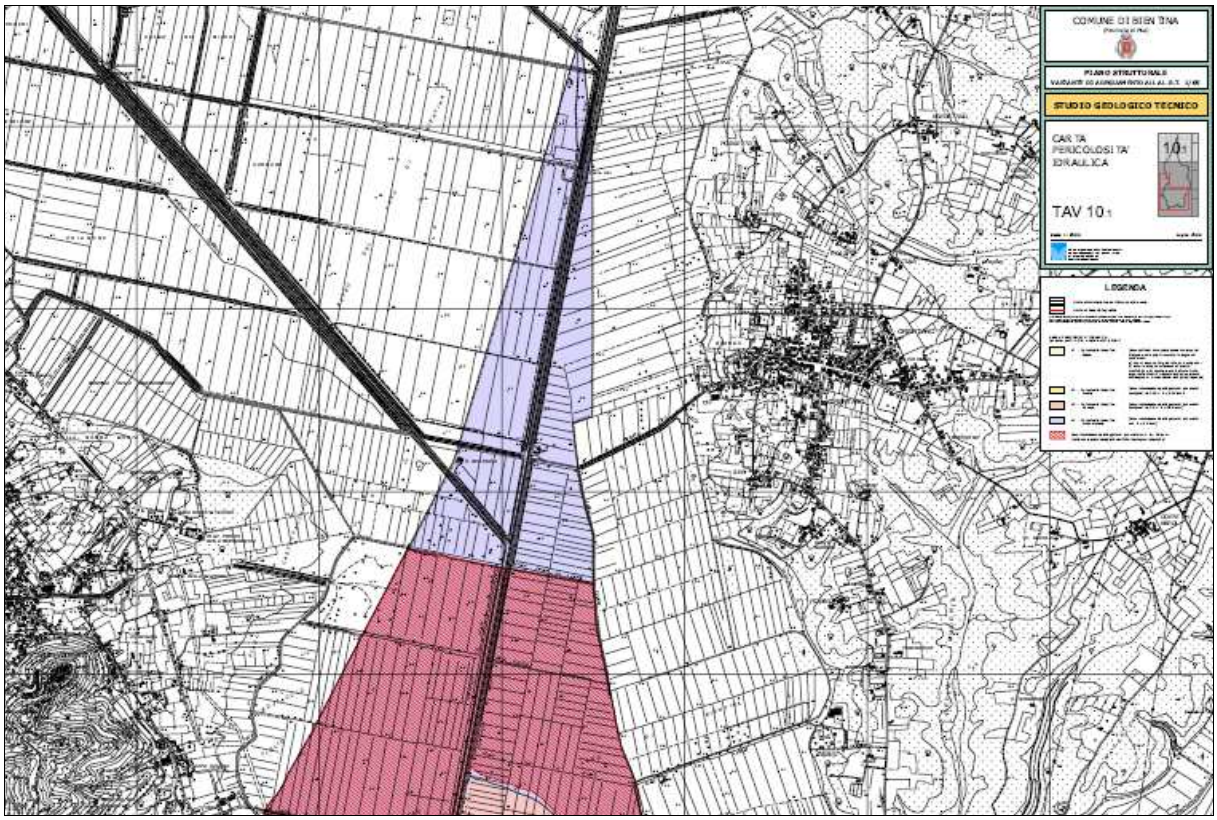


Fig. 1 – Carta della pericolosità idraulica del Piano Strutturale del Comune di Bientina Tav. 10.1

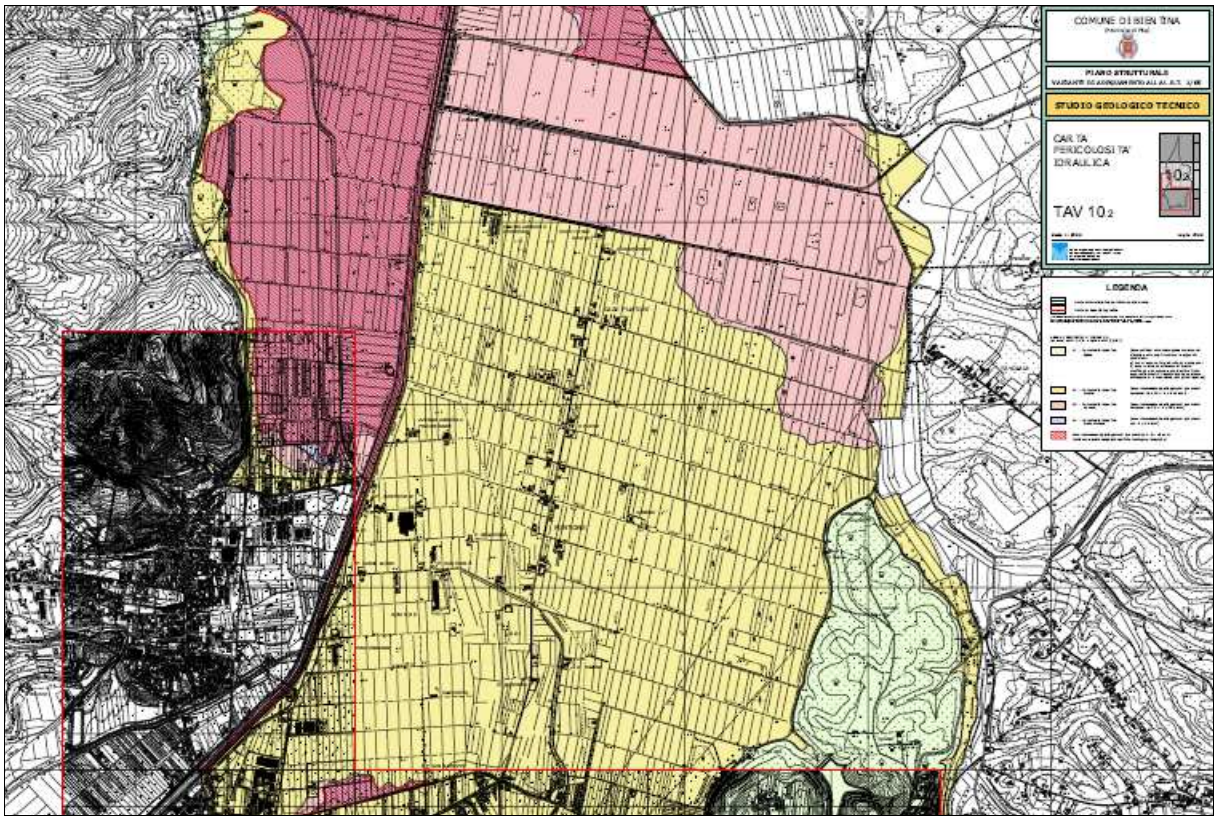


Fig. 2 – Carta della pericolosità idraulica del Piano Strutturale del Comune di Bientina Tav. 10.2

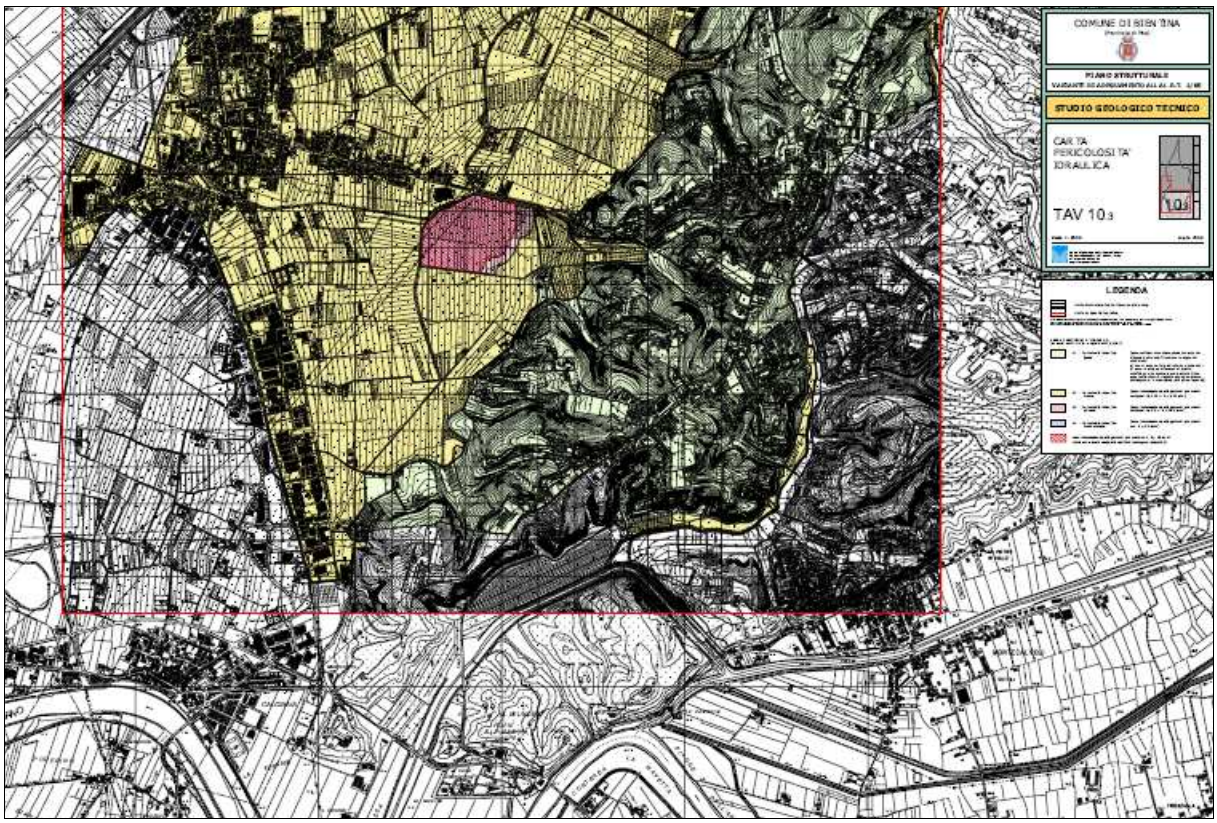


Fig. 3 – Carta della pericolosità idraulica del Piano Strutturale del Comune di Bientina Tav. 10.3

Dalle precedenti cartografie si evince che la porzione Nord del territorio comunale, quella ricadente all'interno dell'ex Lago Sextum-Bientina, è classificata a pericolosità idraulica molto elevata (I.4) o elevata (I.3), mentre la restante parte del fondovalle è classificata in pericolosità idraulica media (I.2); tali perimetrazioni sono legate, secondo lo studio idraulico del 2009, ad esondazioni dirette del Canale Emissario Bientina.

Nelle carte precedenti, in particolare quelle di Fig. 2 e Fig. 3, sono presenti due ulteriori "macchie" rosa, che definiscono due aree a pericolosità idraulica molto elevata e/o elevata per esondazione della Fossa Nuova e del Fosso Fungaia, uniche aste al tempo studiate, oltre al Canale Emissario Bientina.

Dette perimetrazioni, come allora previsto dal D.P.G.R. 26R/2011, ma anche dal vigente D.P.G.R. 53R/2011, hanno portato all'aggiornamento delle carte di pericolosità del Piano di Assetto Idrogeologico dell'ex Autorità di Bacino del Fiume Arno. All'uopo, esse sono state tradotte in perimetrazioni di P.A.I. alla scala 1:10.000, nelle rispettive classi di pericolosità P.I.4, P.I.3 e P.I.2; secondo il P.A.I. alle aree allagate con tempo di ritorno maggiore o uguale a 200 anni era fatta corrispondere una pericolosità idraulica media, P.I.2.

Di seguito è mostrato un estratto delle aree allagate dello studio idraulico redatto per il Regolamento Urbanistico comunale del 2009.

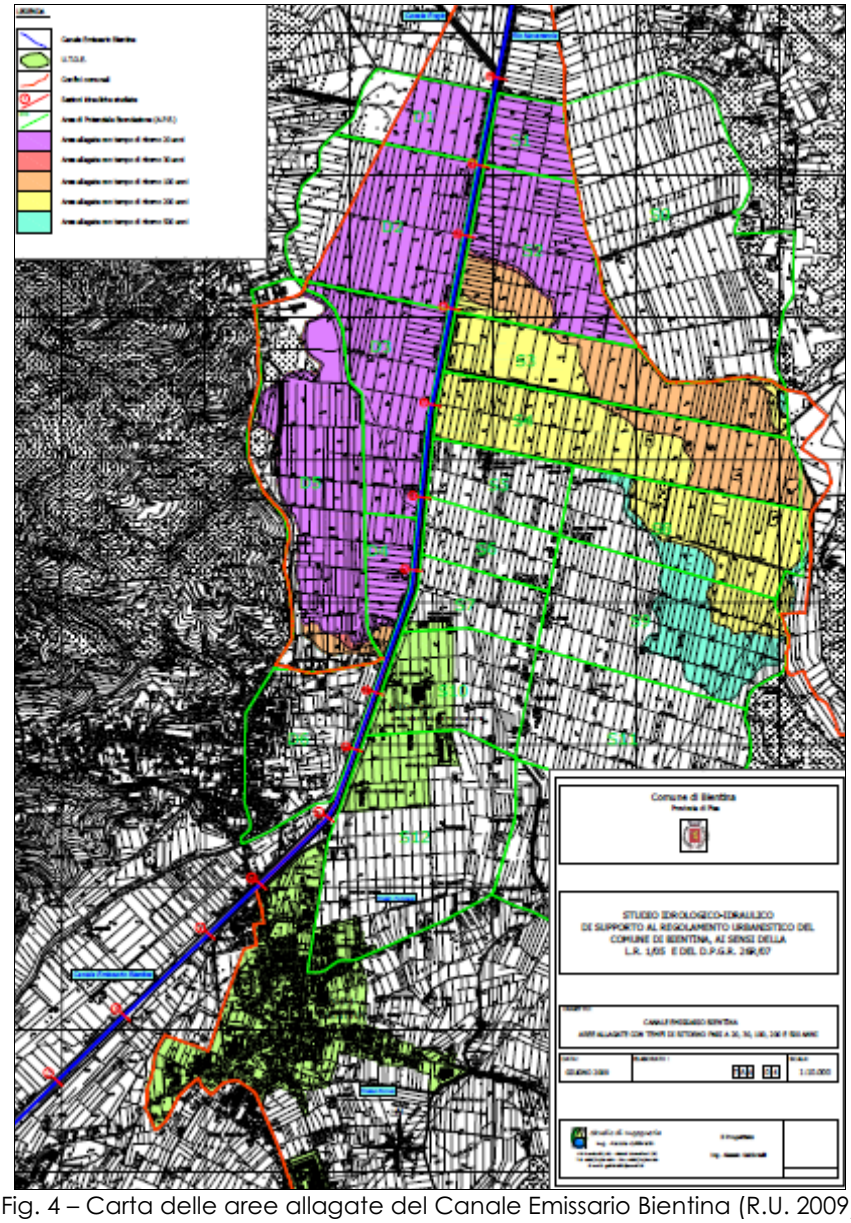


Fig. 4 – Carta delle aree allagate del Canale Emissario Bientina (R.U. 2009)

Le aree prive di colorazione, ovvero quelle poste a Sud del confine dell'ex Lago, non risultavano allagate, neanche per eventi con tempo di ritorno cinquecentennale, da parte del Canale Emissario Bientina.

Ciò nonostante, per l'adeguamento al Piano di Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Fiume Arno, in via cautelativa, tenuto anche conto dell'assenza di studi di dettaglio sul reticolo minore, ad eccezione di Fossa Nuova e Fosso Fungaia, a queste aree prive di allagamento è stata assegnata la pericolosità idraulica media P.I.2 ai sensi del P.A.I.

Ai fini urbanistici, le vecchie Norme di Attuazione del P.A.I. non ponevano particolari vincoli alle trasformazioni su aree a pericolosità idraulica P.I.2.

Di seguito è mostrata la carta con la proposta di adeguamento al P.A.I. redatta nell'ambito dello studio del 2009, che veniva successivamente accolta dal Comitato Tecnico con conseguente aggiornamento della relativa cartografia (D.S.G. n. 95 del 30/11/2009).

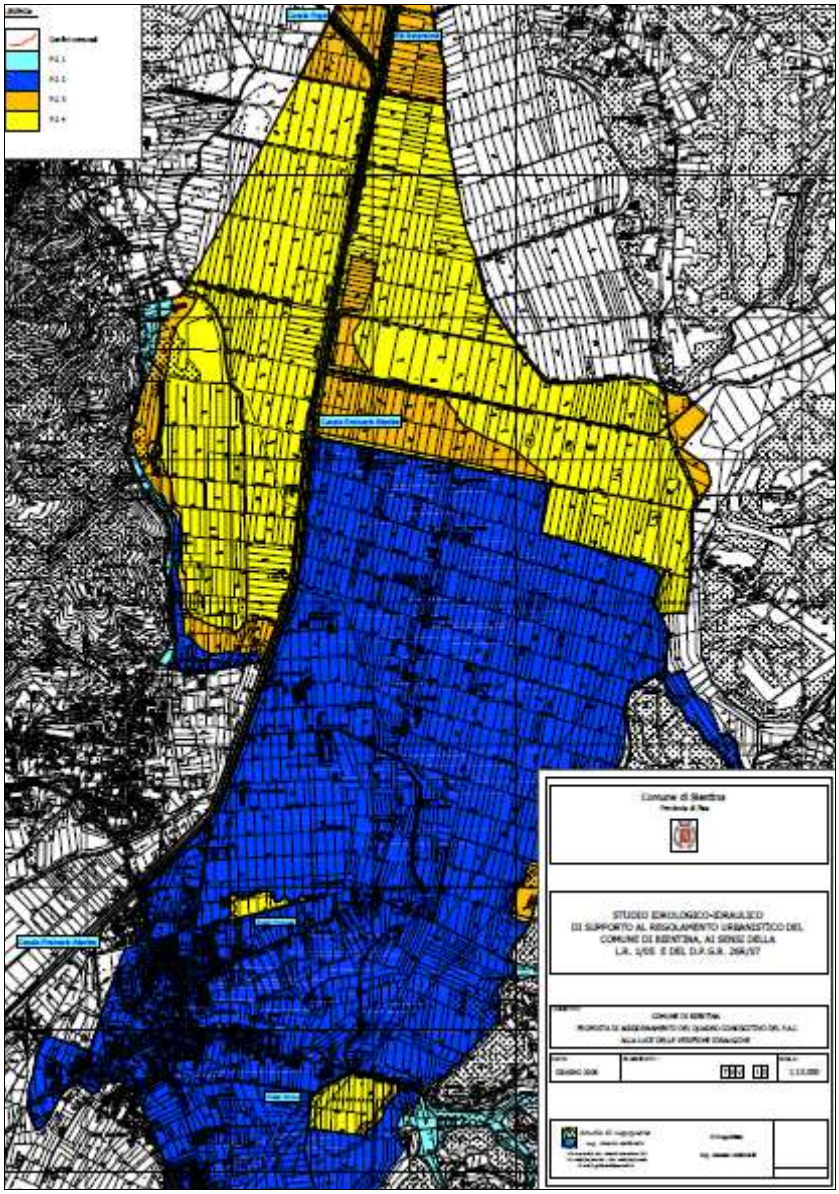


Fig. 5 – Carta di adeguamento al Piano di Assetto Idrogeologico (R.U. 2009)

Le aree indicate in azzurro nella precedente Fig. 5 mostrano chiaramente la classificazione in P.I.2 (pericolosità idraulica media) ai sensi del P.A.I.

Nel passaggio tra carte del P.A.I. e mappe del P.G.R.A. (Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto, adottato in data 17/12/2015) alle aree P.I.2 di P.A.I. è stata fatta corrispondere la "nuova" pericolosità da alluvione media, secondo la definizione del D.Lgs. 49/2010 (attuazione della "Direttiva Alluvioni"), adesso indicata con la sigla P2.

La seguente figura mostra un estratto delle perimetrazioni della pericolosità da alluvione del P.G.R.A. attualmente vigente. Si può facilmente osservare la corrispondenza delle perimetrazioni con quelle del P.A.I. di cui alla precedente Fig. 5.

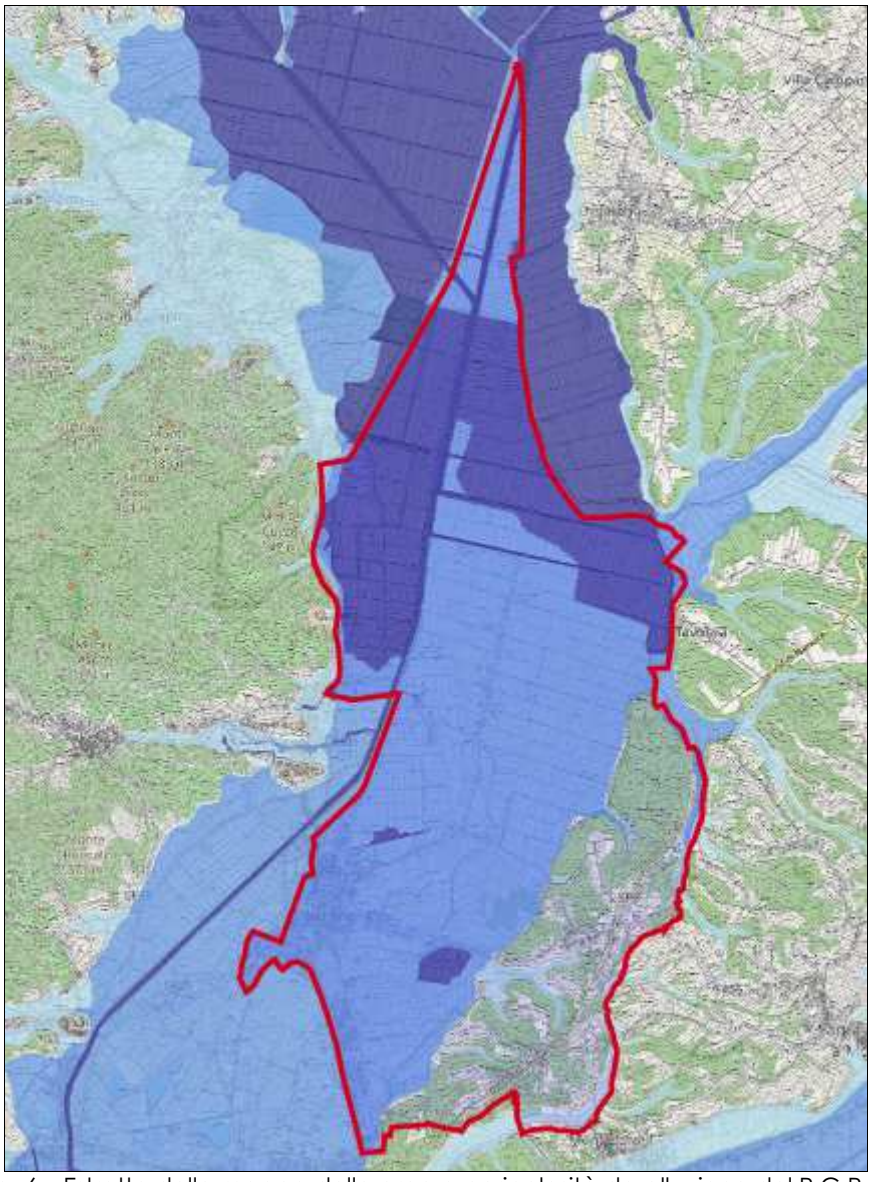


Fig. 6 – Estratto della mappa delle aree a pericolosità da alluvione del P.G.R.A.

Se la precedente disciplina del D.P.G.R. 26R/2007 (secondo il quale, come detto, sono stati redatti gli studi idraulici per il vigente Piano Strutturale e Regolamento Urbanistico del Comune di Bientina) e del successivo D.P.G.R. 53R/2011, nonché le stesse Norme di Attuazione del "vecchio" Piano di Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Fiume Arno, non determinavano particolati vincoli alla realizzazione e/o pianificazione di interventi in aree I.2 (P.S. e R.U.) o P.I.2 (P.A.I.), adesso la Disciplina del P.G.R.A., per le aree a pericolosità da alluvione media P2, limita maggiormente queste trasformazioni.

Ma più che la Disciplina del P.G.R.A. stessa, che piuttosto detta indirizzi per gli strumenti di governo del territorio, a porre vincoli di trasformazione per le aree P2 è recentemente intervenuta la L.R. 41/2018.

Essa, all'art. 18, cita testualmente:

Nelle more dell'adeguamento degli strumenti di pianificazione territoriale o urbanistica comunali alle mappe di pericolosità e rischio di alluvione di cui al d.lgs. 49/2010, si assume come battente di riferimento, qualora non determinato:

a) il battente corrispondente alla quota in alveo della superficie dell'acqua dell'evento alluvionale poco frequente, valutata rispetto al livello del mare;

b) nei casi in cui non sia determinabile la quota in alveo della superficie dell'acqua dell'evento alluvionale poco frequente, il battente pari a 2 metri.

Pertanto, ai sensi della L.R. 41/2018, che fonda i propri criteri di fattibilità per gli interventi di nuova costruzione, per le nuove infrastrutture a rete nonché per gli interventi sul patrimonio edilizio esistente sulle classificazioni del P.G.R.A. e non sulle carte comunali, onde evitare l'applicazione di quanto previsto nel suddetto art. 18, che troverebbe difficile applicazione su un territorio pianeggiante come quello in oggetto, e per di più risulterebbe forse inappropriata per la vetustà degli studi da prendere a riferimento, si è inteso procedere all'aggiornamento del quadro conoscitivo finalizzato al riesame delle mappe di pericolosità.

Ciò consentirà quindi di dotare il Comune di cartografia tematica adeguata per consentire l'applicazione integrale, e non transitoria, delle disposizioni della L.R. 41/2018 per gli interventi edilizi "diretti".

Oltre all'esigenza di "sbloccare" il rilascio dei titoli abilitativi per gli interventi edilizi sul territorio comunale, il presente aggiornamento risponde anche agli obblighi in tal senso imposti dalla normativa urbanistica regionale. Di fatti la L.R. 65/2014 e s.m.i., ed in particolare il D.P.G.R. 53R/2011, prevede che a supporto dei nuovi strumenti urbanistici comunali siano redatti appositi studi idrologico-idraulici, per la definizione della fattibilità delle nuove previsioni urbanistiche.

Si sottolinea che il citato D.P.G.R. 53R/2011 è stato recentemente sostituito dal D.P.G.R. 5R/2020, in vigore da Aprile 2020; con queste nuovo Regolamento si è proceduto ad uniformare la normativa urbanistica in materia di indagini geologiche, idrauliche e sismiche ai contenuti, nonché alle dizioni, della L.R. 41/2018 e del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni.

Dal punto di vista dei contenuti, quindi, il presente studio affronta ed aggiorna le indagini idrauliche sul territorio comunale ai sensi della L.R. 41/2018, producendo nuove carte di pericolosità da alluvione, di battenti, velocità e magnitudo idraulica, e pertanto anticipando parte degli approfondimenti che l'Amministrazione Comunale sarà tenuta a svolgere, ai sensi del nuovo D.P.G.R. 5R/2020, a supporto del futuro Piano Operativo comunale.

2.2 Approccio metodologico degli studi precedenti

In via preliminare appare importante fornire un quadro tecnico circa l'approccio metodologico adottato negli studi idraulici del R.U. 2009 sul Canale Emissario Bientina, in quanto il presente lavoro prende spunto proprio dalle valutazioni precedenti, e si propone, oltre che di revisionare le indagini con dati e modellistiche più appropriate e rispondenti alle attuali normative, soprattutto di perfezionare la rappresentazione delle dinamiche idrauliche del Padule simulandole in modo più realistico e pertinente.

L'ottica del lavoro è infatti quella di pervenire ad una migliore riproduzione dei fenomeni rispetto a quanto fatto in passato, partendo da riscontri oggettivi e dall'osservazione dei comportamenti idraulici del sistema; in un certo senso, pur privi di dati misurati di portate e livelli, nonché di dati geometrici aggiornati, cercando di "tarare" qualitativamente i modelli sulla base degli eventi alluvionali che frequentemente interessano questa porzione di territorio.

Nel fare ciò, oltre a numerosi sopralluoghi, sono state acquisite informazioni presso il Consorzio di Bonifica e altre fonti, consultati gli Annali Idrologici dei primi del '900, consultato materiale disponibile in rete, eseguiti rilievi topografici, etc.

Il fulcro del presente lavoro è rappresentato dal Canale Emissario Bientina, e dal suo funzionamento idraulico regolato dalla cosiddetta "Botte", sottoattraversamento dell'Arno posto in Loc. San Giovanni alla Vena, nel Comune di Vicopisano, completata nel 1859 per conto del Granduca Pietro Leopoldo su progetto dell'Ing. Alessandro Manetti.

Al di là delle incertezze circa la capacità di deflusso attraverso la "Botte", l'aspetto più rilevante per le verifiche idrauliche sul Canale Emissario Bientina è rappresentato dalla stima della portata da applicare in testa al medesimo, alla confluenza tra Canale Rogio e Canale Navareccia, posta in prossimità del bivio per Orentano lungo la S.P. n. 3 Bientina-Altopascio, nell'estrema punta Nord del territorio comunale di Bientina.

Nello studio condotto a supporto del Regolamento Urbanistico di Bientina del 2009 è stato predisposto un modello idrologico semidistribuito di tutto il bacino del Canale Emissario a monte dell'Arno (circa 320 kmq di superficie), ricavando così sia gli idrogrammi di piena da porre in testa al tratto modellato del corso d'acqua (dalla confluenza suddetta alla "Botte") che gli idrogrammi relativi a tutti i contributi laterali.

Di seguito è mostrato un estratto dello studio del 2009 che riporta la suddivisione in bacini del territorio in esame.

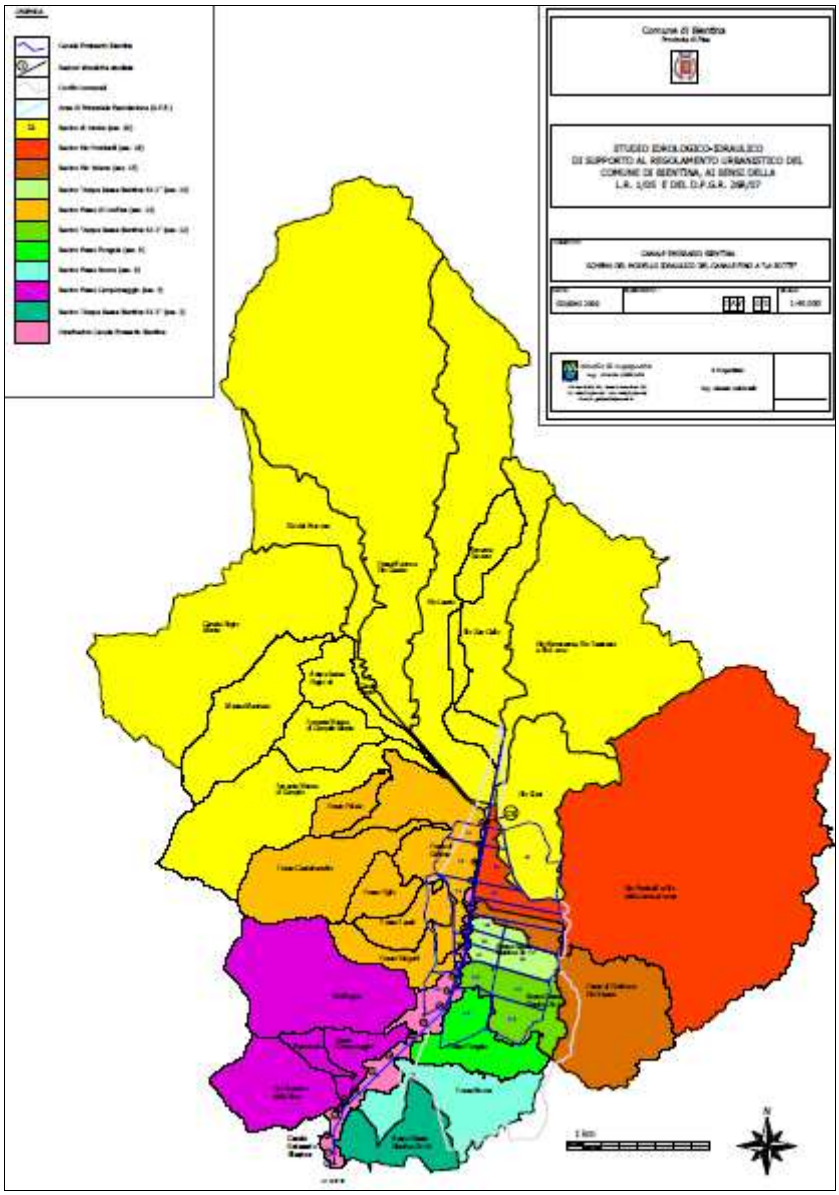


Fig. 7 – Tav. 3 dello studio idrologico-idraulico di supporto al R.U. del Comune di Bientina (2009)

In giallo è individuato il bacino di monte del Canale Emissario Bientina (compresi tutti i vari sottabacini), ovvero quello chiuso alla confluenza tra Canale Rogio e Canale Navareccia, al cui interno ricade buona parte dell'area del Padule e dell'ex Lago Sextum Bientina.

Per quanto il perimetro di detti bacini è stato a suo tempo tracciato su una base cartografica di minor dettaglio (infatti nel presente lavoro i bacini sono stati completamente corretti e riperimetrati), il modello idrologico stimava, alla sezione di monte del Canale Emissario, una portata duecentennale critica pari a circa 934 mc/s (per durata di precipitazione pari a 4 ore).

La seguente figura mostra gli idrogrammi duecentennali allora stimati, ripresi dalla Relazione Idrologica e Idraulica del vecchio studio.

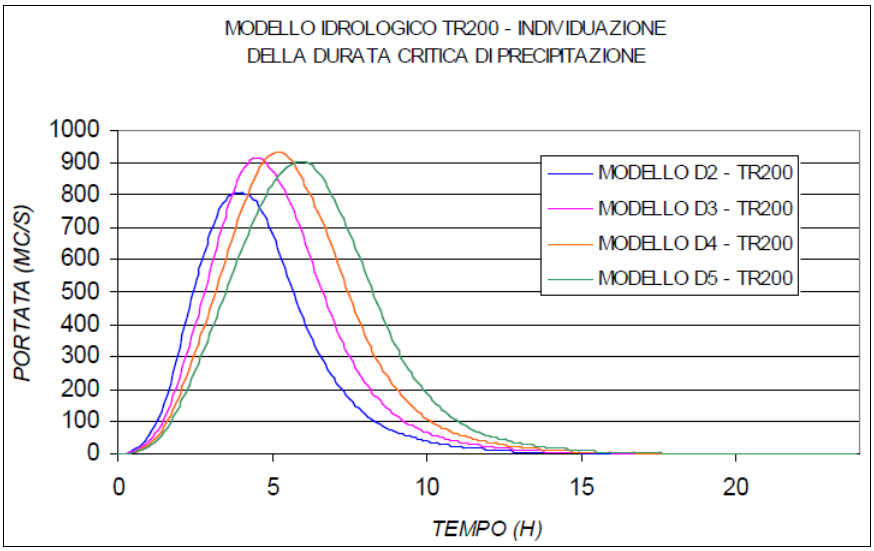


Fig. 8 – Idrogrammi idrologici duecentennali alla sezione di monte del Canale Emissario (R.U. 2009)

Tali idrogrammi facevano riferimento ad un calcolo idrologico puro, ovvero non tenevano in alcuna considerazione l'evidente effetto di laminazione del Padule. Se introdotti *tout court* nel modello del Canale Emissario avrebbero prodotto uno scenario di allagamento del tutto improbabile.

Pertanto, in assenza allora come oggi di alcun dato funzionale ad una ipotesi di taratura, si è inteso, in accordo con l'Autorità di Bacino del Fiume Arno, attuare un "taglio" degli apporti idrologici a simulare una parziale laminazione del Padule, limitato agli idrogrammi di alcuni corsi d'acqua più significativi.

Attraverso questa correzione, quantificata in una riduzione di portata variabile tra il 20% ed il 60% sui corsi d'acqua Fosso di Confine, Rio Vaiano, Rio Ponticelli, Canale Rogio, Rio Leccio, Fossa Nuova e Torrente Visona di Compito, gli idrogrammi finali introdotti nel modello del Canale Emissario, sia in testa che laterali, sono risultati decisamente inferiori, come mostra la seguente figura, da porre in confronto con la precedente Fig. 8.

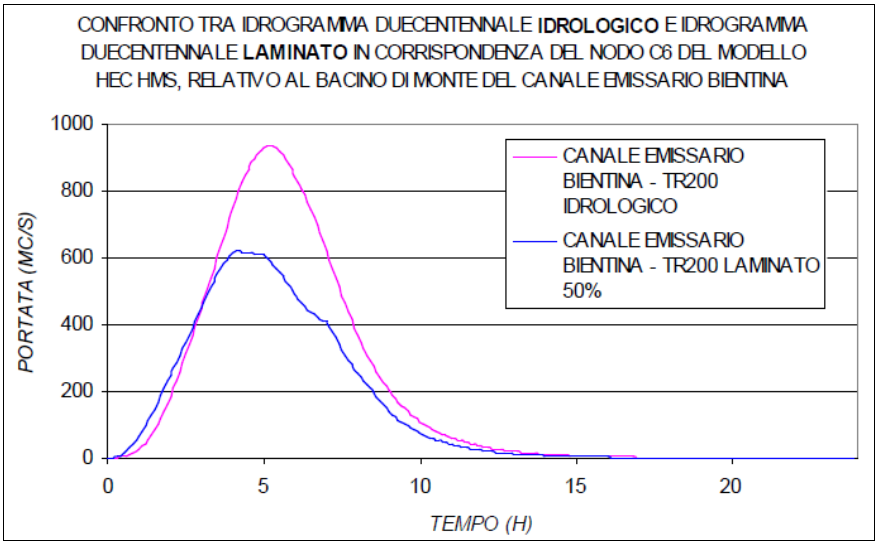


Fig. 9 – Confronto tra idrogramma idrologico e idrologico "laminato" per TR200 e durata di pioggia di 4 ore alla sezione di monte del Canale Emissario (R.U. 2009)

Grazie a questa operazione di "abbattimento" del picco di portata sui principali idrogrammi la modellazione del Canale Emissario ha fornito i risultati illustrati nel capitolo precedente, che comunque hanno confermato il contenimento degli allagamenti entro il confine dell'ex Lago, pur riportando sormonti arginali sia in destra che in sinistra idraulica (su strada provinciale) per tutto il tratto di monte del modello.

Nel presente lavoro si è inteso superare l'incertezza circa la quantificazione dell'effetto laminativo del Padule, e quindi predisporre un modello idrologico maggiormente approfondito e discretizzato soprattutto per il bacino di monte del Canale Emissario, che, unitamente alla revisione della condizione di valle presso la "Botte", consentisse di rappresentare in modo più realistico le dinamiche di esondazione e di quantificarne meglio le grandezze caratteristiche.

Questo rappresenta uno dei principali obiettivi del presente studio, e ciò che maggiormente lo differenzia da quello del 2009.

Del resto è intuibile come, con l'entrata in vigore della L.R. 41/2018, sia adesso necessario pervenire ad una definizione più precisa non solo delle aree allagabili, da cui le conseguenti pericolosità, ma anche dei battenti e delle velocità di propagazione, pertanto adesso non ci si è potuti "accontentare" di una semplice revisione della modellistica idrologica di allora.

Una più accurata definizione delle portate in ingresso al Canale Emissario risulta inoltre indispensabile non solo per la ricostruzione delle dinamiche di allagamento del medesimo, ma anche per l'assegnazione delle corrette condizioni al contorno (livelli alla confluenza) di tutto il reticolo minore studiato.

La metodologia di indagine adottata nel presente lavoro è sintetizzata nel successivo paragrafo

2.3 Obiettivi e metodologia di indagine del nuovo studio

Alla luce di quanto anticipato in precedenza, è di seguito fornita una sintesi degli obiettivi "urbanistici" e "modellistici" del presente studio e dell'approccio metodologico impiegato per perseguirli.

Come esposto nella Premessa generale, il presente studio è redatto al fine di aggiornare il quadro conoscitivo comunale per quanto attiene agli aspetti idraulici.

Ai sensi della L.R. 41/2018 risulta necessario provvedere al riesame delle mappe di pericolosità da alluvione e produrre anche nuove mappe dei battenti di esondazione, delle velocità di propagazione e della magnitudo idraulica.

Detto aggiornamento inerisce prevalentemente l'ambito edilizio ed urbanistico; solo attraverso questa revisione del quadro conoscitivo sarà possibile applicare correttamente su tutto il territorio comunale le disposizioni di cui alla L.R. 41/2018 nonché delineare la fattibilità idraulica delle previsioni urbanistiche del redigendo Piano Operativo comunale.

Alla luce di ciò, l'interesse del presente lavoro è prevalentemente rivolto alla porzione urbanizzata del territorio comunale, e, più in generale, a quella in cui sono presenti insediamenti.

Pertanto la parte Nord del territorio comunale, quella ricadente entro l'ambito dell'ex Lago di Sextum Bientina e quindi più propriamente appartenente al Padule, di cui sono noti i frequenti allagamenti anche per eventi meteorici di non particolare intensità o durata, risulta, ai fini del presente lavoro, abbastanza marginale, fatta salva l'esigenza di produrre le mappature di cui sopra anche su questa area.

Assumono invece maggiore rilevanza tutti gli affluenti sinistri del Canale Emissario Bientina posti nella parte Sud, a valle del Fosso di Confine (o Fosso Zero), a partire quindi dal Fosso Ranocchia fino alla Fossa Nuova, in quanto interessano le aree urbanizzate o con presenza di edificato sparso, all'interno delle quali saranno dislocate anche le principali previsioni di sviluppo urbanistico ed infrastrutturale del territorio.

E' quindi su questa porzione di territorio che si manifesta l'esigenza di un maggior grado di approfondimento, come richiamato dallo stesso verbale della primo incontro di coordinamento avente oggetto le nuove verifiche idrologiche ed idrauliche sul Comune di Bientina svoltosi presso gli uffici del Genio Civile Valdarno Inferiore nel mese di luglio 2018.

Per poter pervenire ad una corretta definizione del nuovo quadro conoscitivo soprattutto nella parte Sud risulta però necessario partire da un'adeguata analisi proprio del comportamento idraulico della parte Nord, e soprattutto del Canale Emissario, che resta elemento centrale dell'intero sistema idrografico in esame; i livelli idrometrici da esso raggiunti in caso di piena determinano infatti le condizioni al contorno per tutti i suoi affluenti, compresi i numerosi fossi interferenti con le aree urbanizzate, sia che siano dotati o sprovvisti di organi di regolazione allo scarico (portelle, clapet, paratoie).

Ma il comportamento del Canale Emissario è a sua volta legato alle dinamiche del sistema del Padule; da qui l'esigenza di estendere l'analisi anche ai territori e al reticolo di monte, esterni al confine comunale di Bientina.

Al contempo, si è osservata la rilevanza della condizione di valle dell'asta del Canale Emissario Bientina, presso la "Botte" di sottoattraversamento del Fiume Arno; si è quindi proceduto anche alla rivalutazione della relativa scala di deflusso.

L'approccio metodologico adottato per raggiungere gli obiettivi appena fissati **fonde insieme l'analisi "puramente" idrologica e l'analisi "tipicamente" idraulica**, rappresentata, la prima, da modellistica a parametri semidistribuiti con software HEC HMS, e la seconda da modellistica idraulica bidimensionale con software MIKE FLOOD.

Al limite dei modelli idrologici "puri" nel ricostruire fenomeni di laminazione naturale, salvo casi più semplificati e/o in presenza di opere idrauliche dal funzionamento noto, si è così voluto sopperire implementando un modello idraulico assai articolato di buona parte del sistema idrografico del Padule.

In sostanza **l'idraulica viene in soccorso dell'idrologia**; tenuto conto delle incertezze rappresentate, da un lato, dalla mancanza di dati geometrici sul reticolo (ma disponibilità di dati Lidar), e dall'altro, di estrema complessità nella ricostruzione delle superfici scolanti del Padule e di sostanziale impossibilità di riprodurre su base idrologica pura la laminazione dello stesso, si è puntato sul potenziamento del modello idraulico contro le maggiori incertezze del modello idrologico (dimostrate anche in occasione degli studi del 2009 in cui è stato assunto un contributo di laminazione sulla base di considerazioni poco più che qualitative).

Attraverso questo approccio si è potuto valutare non soltanto i dati di input al modello idraulico del "solo" Canale Emissario, che di fatto resta il medesimo degli studi precedenti, ma anche ricostruire i fenomeni esondativi su un'ampia porzione del Padule stesso, nonostante ciò non rappresentasse uno degli obiettivi primari del lavoro. Il tutto applicando comunque criteri e parametrizzazioni cautelative nella costruzione sia della **parte idrologica** che della **parte idraulica** del modello.

Questo modello, di seguito definito **"modello Padule"**, ha quindi consentito di:

1. determinare la portata di picco in ingresso al modello del "solo" Canale Emissario, funzionale solo alla determinazione dei massimi livelli idrometrici lungo l'asta, da assumere successivamente come condizioni di valle per il modello idraulico dei fossi minori;
2. definire aree allagate, battenti e velocità sulla porzione Nord del territorio comunale. Come di seguito illustrato, per la complessità del "modello Padule", non sono stati simulati però tutti gli scenari di studio, pertanto i risultati in termini di aree allagate, battenti e velocità per la porzione Nord del territorio non hanno poi condotto ad aggiornamento del quadro conoscitivo in queste aree.

Al "modello Padule", previa preliminare implementazione del modello del "solo" Emissario, ha fatto seguito il modello dei corsi d'acqua minori, denominato **"modello Bientina"**, grazie al

quale sono state definite aree allagate, battenti e velocità sulla porzione Sud del territorio comunale.

Il "modello Bientina" rappresenta un modello più tradizionale, con parte idrologica e parte idraulica distinte.

Analizzando un territorio prevalentemente pianeggiante, la parte idrologica del "modello Bientina" ha riguardato solo alcuni piccoli bacini collinari ed alcuni bacini urbani, per i quali è stato predisposto un modello HEC HMS ad hoc con criteri analoghi a quelli adottati per il "modello Padule".

Per la parte idraulica del "modello Bientina" è stato approntato un modello idraulico bidimensionale separato da quello del "modello Padule" in cui sono state rappresentate le principali aste interferenti con il territorio urbanizzato; in questo per la ricostruzione delle geometrie sono stati eseguiti appositi rilievi topografici o utilizzati dati di rilievi già disponibili.

Per le condizioni al contorno dei vari corsi d'acqua si è fatto riferimento ai livelli idrometrici risultati dal modello idraulico del "solo" Canale Emissario precedentemente citato, ovvero un modello "intermedio" e semplificato che, previe opportune valutazioni, elabora i risultati ottenuti con il "modello Padule".

Di seguito è mostrato lo **schema logico dello studio**.

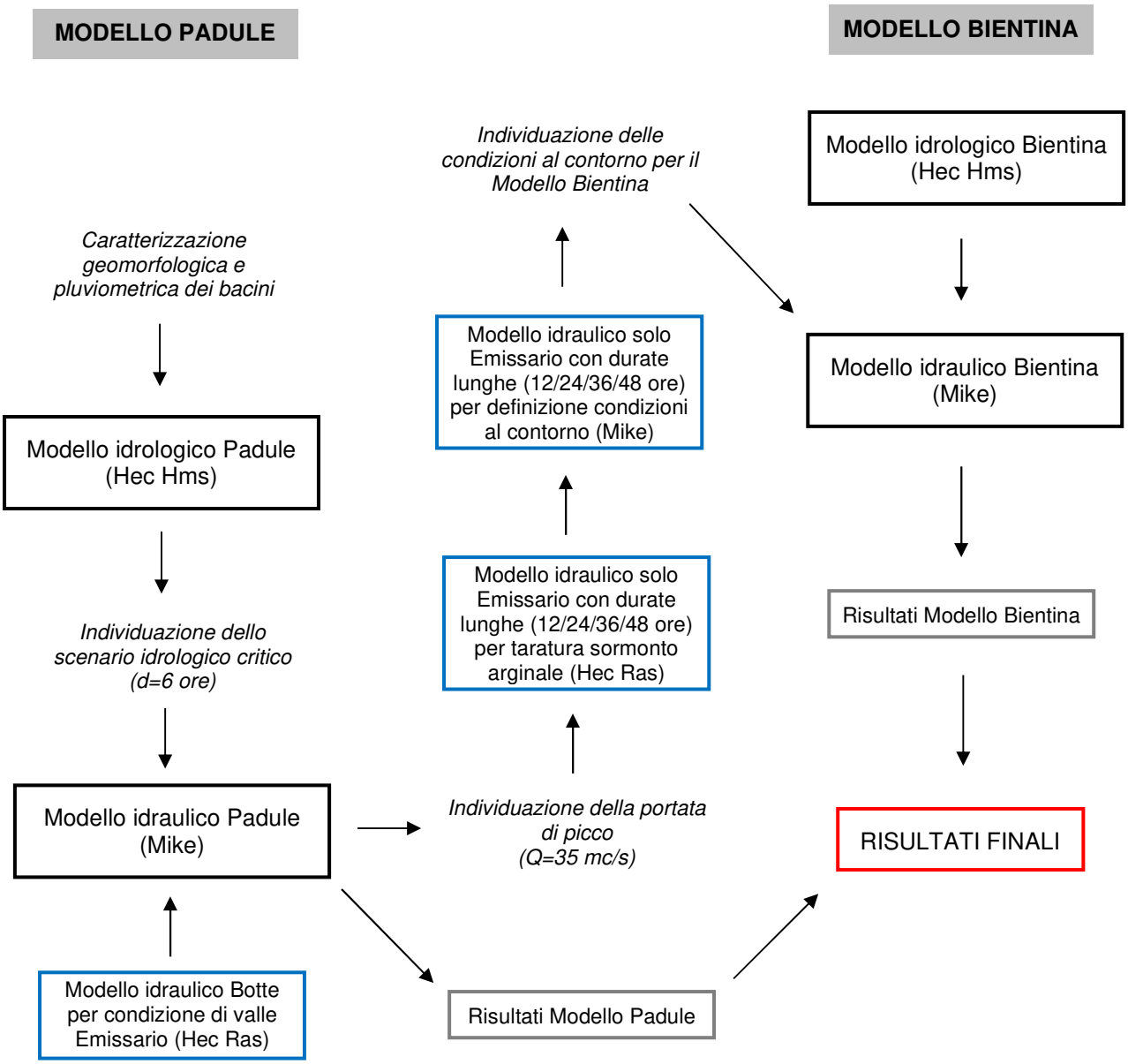


Fig. 10 – Schema logico di articolazione dello studio

Dal precedente diagramma a blocchi si evince immediatamente la complessità del lavoro svolto e la copiosità dei passaggi modellistici sviluppati per giungere ad un quadro affidabile e verosimile.

Oltre alla complessità logica del lavoro è da sottolineare il pesante carico modellistico, in particolare per quanto riguarda il "modello Padule", dovuto all'estensione areale dell'area di studio e alla copiosità delle aste modellate.

Di ciò è dato conto nei relativi capitoli di illustrazione dei modelli idrologici ed idraulici.

2.4 Articolazione del lavoro

Per fare un po' di ordine circa l'articolazione del lavoro è di seguito riepilogata la progressione delle varie fasi.

Cap. 3 - Inquadramento generale dell'area di studio

Per favorire la successiva trattazione modellistica, e innanzitutto presentata una descrizione dei principali aspetti che riguardano i bacini ed il reticolo di studio.

Cap. 4 - Idrologia: il "Modello Padule"

In questo capitolo è sviluppata la presentazione del modello idrologico del Padule, compresa la caratterizzazione geomorfologica e pluviometrica dei bacini di studio.

Cap. 5 – Idraulica: il "Modello Padule"

In questo capitolo è sviluppata la presentazione del modello idraulico del Padule e del Canale Emissario Bientina, finalizzato prevalentemente all'individuazione della portata di picco del medesimo.

In questo capitolo sono illustrati anche i criteri di determinazione della nuova scala di deflusso presso la "Botte".

Inoltre è fatto rientrare in questa sezione anche la definizione dei massimi livelli idrometrici del Canale Emissario Bientina, il cosiddetto modello "solo" Emissario (passaggi di cui alla colonna centrale dello schema di Fig. 10), per le condizioni al contorno del successivo modello idraulico dei fossi minori ("modello Bientina").

Cap. 6 - Idrologia: il "Modello Bientina"

In questo capitolo è sviluppata la presentazione del modello idrologico della parte Sud del territorio comunale, compresa la caratterizzazione geomorfologica e pluviometrica dei bacini di studio. In questo caso trattasi di modello più semplice rispetto al precedente, all'interno del quale sono analizzati anche i contributi delle principali aree urbane.

Cap. 7 – Idraulica: il "Modello Bientina"

In questo capitolo è illustrato il modello idraulico dei fossi minori, ovvero gli affluenti sinistri del Canale Emissario, redatto con metodologia analoga a quella del "modello Padule", ma su un territorio più ridotto.

Cap. 8 – Risultati finali delle verifiche idrauliche e considerazioni

In questo ultimo capitolo sono illustrati i risultati complessivi del lavoro svolto e formulate alcune considerazioni circa i medesimi e circa le principali criticità idrauliche riscontrate sui sistemi idraulici esaminati.

3. INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA DI STUDIO

In questo capitolo sono passate brevemente in rassegna le principali caratteristiche dell'area di studio, sia per quanto riguarda i bacini imbriferi e le superficie scolanti, che per quanto riguarda il reticolo idrografico e di bonifica, comprese informazioni circa le opere idrauliche di regimazione e regolazione presenti sul territorio.

Tale illustrazione non intende sostituirsi alle ben più ampie e dettagliate trattazioni sul Padule prodotte nell'ambito di documenti ufficiali (come ad esempio Piani di Bonifica/Classifica) e altri documenti scientifici, storici e/o divulgativi consultabili in rete o in altri archivi pubblici.

Essa ha semplicemente la finalità di inquadrare e fissare, anche mediante semplificazioni, alcuni elementi di funzionamento e correlazione idraulica ed alcune grandezze caratteristiche del sistema del Padule funzionali alle scelte metodologiche effettuate e allo sviluppo della trattazione tecnica dei capitoli successivi.

3.1 Il Padule ed il Canale Emissario Bientina

Il Padule di Bientina rappresenta un'ampia porzione di territorio che ricade a cavallo tra le Provincie di Lucca e Pisa.

Al suo interno, anticamente, si sviluppava il Lago il Bientina, o di Sesto, che aveva come principale immissario il Canale Rogio - Canale Ozzeri, provenienti dalla Piana di Lucca e legati, in particolare l'Ozzeri, al reticolo del Fiume Serchio. Essendo però l'area posta a quote inferiori rispetto al corso d'acqua del Serchio, su di essa le acque tendevano ad accumularsi e ristagnare a lungo, dando luogo ad un ambiente lacustre e paludoso, di superficie bagnata variabile; nei periodi piovosi lo specchio d'acqua del Lago di Bientina, prima della bonifica, risultava essere il più esteso dell'intera Toscana.

In quest'area convergevano, e convergono tutt'oggi, le acque provenienti dall'area montuosa posta a Nord della Piana di Lucca (altopiano delle Pizzorne) e dai territori pianeggianti di valle (Comuni di Capannori, Montecarlo, Porcari ed Altopascio). Inoltre il Padule riceve le acque provenienti dai Monti Pisani ad Ovest (Comuni di Capannori e Buti), e delle Colline delle Cerbaie ad Est (Comuni di Castelfranco di Sotto, Santa Maria a Monte, Santa Croce sull'Arno e in parte anche Fucecchio).

Il Comune di Bientina, da cui il nome del Lago, ricadeva soltanto nella parte di valle dello stesso, ove ha attualmente origine l'emissario dell'ex Lago, ovvero il Canale Emissario Bientina, che a partire dai due principali canali di drenaggio del Padule, Canale Rogio e Canale Navareccia, attraversa il fondovalle in modo pressoché rettilineo fino alla "Botte" di sottoattraversamento dell'Arno, interessando il Comune di Bientina, prima, e successivamente i Comuni di Buti e Vicopisano.

La realizzazione del Canale Emissario Bientina, allora denominato "Canale Imperiale", risale al XVIII secolo. Dapprima esso scaricava le acque del Lago nel Fiume Arno attraverso le cosiddette Cateratte Ximeniane, tuttora presenti, poste in Loc. Riparotti nel Comune di Vicopisano.

Successivamente, grazie alla realizzazione dell'imponente "Botte" di attraversamento dell'Arno, a metà del XIX secolo, il Lago venne definitivamente prosciugato, consegnando al Padule le attuali caratteristiche e conformazione, salvo implementazione, nel tempo, di tutta la restante rete di bonifica del Padule.

Il bacino complessivamente afferente al sistema del Padule, chiuso alla sezione della "Botte", presenta una **superficie complessiva pari a 320 kmq**, che comprende sia la cornice montuosa e collinare del Basso Appenino Lucchese, dei Monti Pisani e delle Colline delle Cerbaie posta rispettivamente al margine Nord, Ovest ed Est del bacino, sia l'ampia pianura di una porzione della Piana di Lucca, del Padule e del restante fondovalle del Canale Emissario fino al Fiume Arno.

L'operazione di tracciamento del limite del bacino, eseguita ex novo nel presente lavoro ha presentato notevoli difficoltà in quanto in alcune aree esso transita attraverso porzioni pianeggianti, su cui non sono facilmente individuabili crinali o linee di spartiacque.

Questa condizione riguarda principalmente la porzione Ovest e Nord-Ovest, sulla Piana di Lucca, e la porzione Est in territorio di Altopascio e Fucecchio.

Per di più **il Canale Rogio risulta idraulicamente collegato con il Canale Ozzeri**, che drena buona parte della Piana di Lucca in sinistra idraulica del Fiume Serchio, pertanto **il punto di chiusura del bacino lungo il Rogio è fatto convenzionalmente coincidere con la "sella" presente circa 600 m a monte della confluenza con l'Ozzeri**, analogamente a quanto fatto negli studi precedenti. Questa "sella" è indicata nella tavola **T.1 – Bacino e reticolo idrografico del Canale Emissario Bientina** allegata.

La parte Nord del bacino del Canale Emissario Bientina è idealmente separata dal vero e proprio Padule dal tracciato dell'autostrada A11, che taglia il bacino in linea pressappoco orizzontale, e attraversa i Comuni di Altopascio, Porcari e Capannori.

Nel presente studio il tracciato autostradale è stato assunto come limite superiore dell'area di studio per quanto riguarda il modello idraulico del Padule.

Sempre per convenzione, attualmente il limite Sud del Padule è fissato in corrispondenza del Fosso di Confine, o Fosso Zero, in sinistra idraulica del Canale Emissario, e in corrispondenza della cosiddetta "Tura" in destra idraulica, al confine tra Bientina e Buti.

L'ex pianura alluvionale si estende, soprattutto in sinistra idraulica (Comune di Bientina) anche a Sud del Fosso di Confine, ed è caratterizzata da aree depresse e di ristagno, poste a cavallo della Via del Puntone e servite, parimenti a quelle del Padule, dall'omonimo impianto di sollevamento.

La seguente figura riporta l'estensione del bacino del Canale Emissario Bientina, evidenziando il confine comunale di Bientina e di tutti altri territori comunali interessati; è riportata anche l'asta principale del corso d'acqua, l'ubicazione della "Botte" ed il tracciato autostradale.

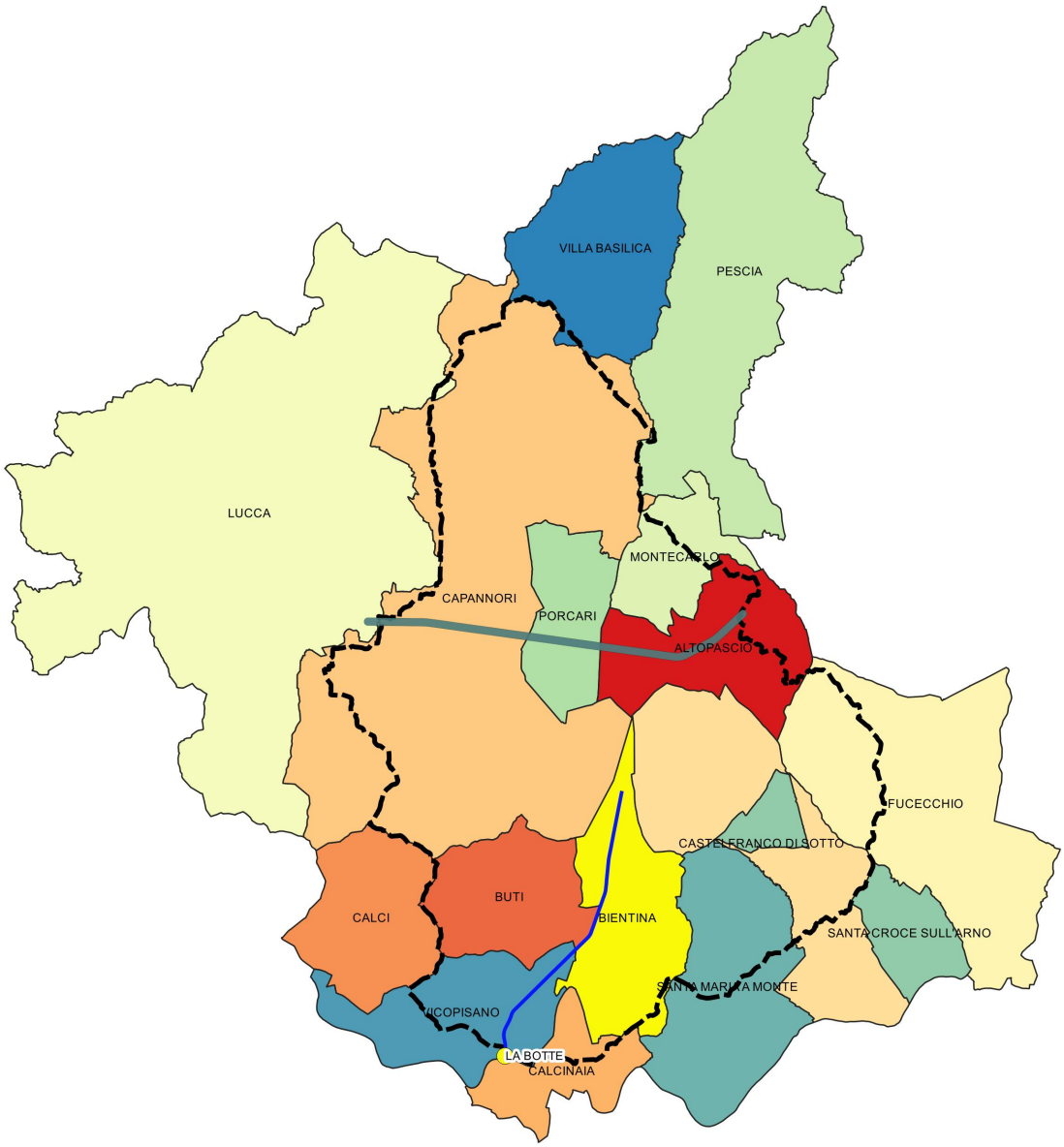


Fig. 11 – Bacino del Canale Emissario Bientina e confini amministrativi

Già da questo primo inquadramento si può apprendere come il presente studio, finalizzato al riesame delle mappe di pericolosità da alluvione per il solo Comune di Bientina, abbia necessitato di analisi dettagliata su un territorio ben più esteso.

Al di là di questi cenni di carattere generale, appare opportuno già anticipare quello attualmente risulta essere il funzionamento qualitativo del sistema idraulico del Padule e del Canale Emissario.

L'**asta del Canale Emissario Bientina**, **di lunghezza pari a circa 11 km** se valutata alla sezione della "Botte", **risulta alimentata essenzialmente da due grandi canali di bonifica**, il **Canale Rogio**, proveniente da Ovest, di notevole lunghezza (circa 14 km) e a cui afferiscono le acque di parte della Piana di Lucca e del settore Nord dei Monti Pisani, ed il **Canale della Navareccia**, assai più corto ma che prima della confluenza con il Rogio riceve le acque di importanti corsi d'acqua provenienti dal Basso Appenino Lucchese (Fossa Nuova, Rio Leccio etc) e quelle di alcuni corsi d'acqua della parte collinare Est, come il Rio Lama.

L'asta del Canale Emissario Bientina prende denominazione ed origine proprio a partire dalla suddetta confluenza tra Canale Rogio e Canale della Navareccia, confluenza che è situata proprio nell'estrema punta Nord del Comune di Bientina.

La portata in ingresso al Canale Emissario è essenzialmente legata all'apporto di Canale Rogio e Canale della Navareccia.

Tutti gli affluenti di valle, alcuni dei quali anche piuttosto significativi, come il Rio Ponticelli che drena gran parte delle Colline delle Cerbaie, il Rio Magno che nasce dal Monte Serra e attraversa il Comune di Buti, o il Rio Grande (o Rio del Romitorio) che attraversa l'abitato di Vicopisano), concorrono in misura minore alla formazione delle piene del Canale Emissario. Infatti alcuni di essi, quelli più a monte come il citato Rio Ponticelli, risultano dotati di organo di regolazione (portelle, porte "vinciane") pertanto non sono in grado di fornire alcun contributo al Canale Emissario in caso di entrata in funzione di detti organi; altri come il Rio Magno, invece, esondano sul fondovalle prima di riversarsi nell'Emissario, fornendo quindi un contributo minore perché laminato; altri ancora, come il Rio Grande, vi confluiscono ormai in prossimità della "Botte", dove il comportamento idraulico è sostanzialmente "comandato" dalla relativa scala di deflusso.

Ciò detto, **il funzionamento del sistema Emissario**, in caso di piena, **è correlato alla portata in ingresso, laminata dal Padule, e alla capacità di smaltimento in uscita, attraverso la "Botte"**.

Pertanto, per la simulazione del passaggio di un'onda di piena lungo i circa 11 km di asta del Canale Emissario è necessario ricostruire le dinamiche idrauliche del Padule e stimare l'apporto congiunto di Canale Rogio e Canale della Navareccia (**condizione di monte**) e adottare una corretta scala di deflusso presso la "Botte" (**condizione di valle**).

3.2 Il reticolo idrografico

In questo paragrafo sono fornite maggiori precisazioni ed elementi circa il reticolo idrografico che ricade all'interno del bacino complessivo del Canale Emissario Bientina.

La tavola **T.1 – Bacino e reticolo idrografico del Canale Emissario Bientina** allegata al presente lavoro mostra il reticolo idrografico regionale di cui alla L.R. 79/2012, nella versione più recente della D.C.R. 20/2019.

Del reticolo sono "etichettati" i corsi d'acqua principali, adottando la denominazione ufficiale del reticolo regionale. Molti di questi corsi d'acqua, specialmente quelli minori, assumono comunemente denominazioni differenti, anche nelle cartografie dell'ex Consorzio di Bonifica Auser-Bientina, ora confluito nel Consorzio di Bonifica Toscana Nord.

Il reticolo idrografico si compone di aste aventi caratteristiche assai diverse l'una dall'altra, a cui afferiscono bacini anch'essi morfologicamente eterogenei. Limitandosi a quelli principali, è possibile classificare i corsi d'acqua secondo il seguente criterio:

1. Corsi d'acqua caratterizzati da bacini quasi interamente montani e collinari, che giungono sul fondovalle fondendosi col reticolo di bonifica per brevi tratti prima di confluire nel Canale Emissario. Queste caratteristiche sono principalmente attribuite ai bacini della parte Sud dei Monti Pisani.
2. Corsi d'acqua caratterizzati da bacini quasi interamente montani e collinari, che giungono sul fondovalle fondendosi col reticolo di bonifica per lunghi tratti prima di confluire nel Canale Rogio. Queste caratteristiche sono principalmente attribuite ai bacini della parte Nord dei Monti Pisani.
3. Corsi d'acqua caratterizzati da bacini interamente collinari, che giungono sul fondovalle fondendosi col reticolo di bonifica per lunghi tratti prima di confluire nel Canale della Navareccia o nel Rio Ponticelli, o più genericamente nel Padule. Queste caratteristiche sono principalmente attribuite ai bacini della parte Est delle Colline delle Cerbaie.
4. Corsi d'acqua caratterizzati da bacini parzialmente montani e collinari, nella parte Nord, e successivamente pianeggianti, che attraversano aree urbanizzate prima di giungere nel Padule fondendosi col reticolo di bonifica. Queste caratteristiche sono principalmente attribuite ai bacini lucchesi, provenienti dai monti del Basso Appennino Lucchese.

5. Corsi d'acqua caratterizzati da bacini interamente pianeggianti, che attraversano aree urbanizzate prima di giungere al Canale Rogio o più genericamente al Padule. Queste caratteristiche sono principalmente attribuite ai bacini della Piana di Lucca, ricadenti sui Comuni di Capannori e Porcari.

Secondo le categorie suddette, ad eccezione dei bacini di cui al punto 5, interamente pianeggianti, tutti i restanti corsi d'acqua si sviluppano su bacini prevalentemente naturali. Soltanto una porzione di essi ricade all'interno del Padule o sul fondovalle del Canale Emissario Bientina.

Ipotizzando un "taglio" dei bacini Nord in corrispondenza del tracciato autostradale, e dei bacini Ovest ed Est in corrispondenza del cambio di pendenza in ingresso al Padule, o al fondovalle del Canale Emissario, è possibile compiere una suddivisione semplificata, ma "accettabile", tra quello che può definirsi reticolo naturale (o di acque alte) e **reticolo di bonifica (o di acque basse)**.

Questa differenziazione è funzionale all'analisi idrologica che segue, ed è sintetizzata nella successiva figura.

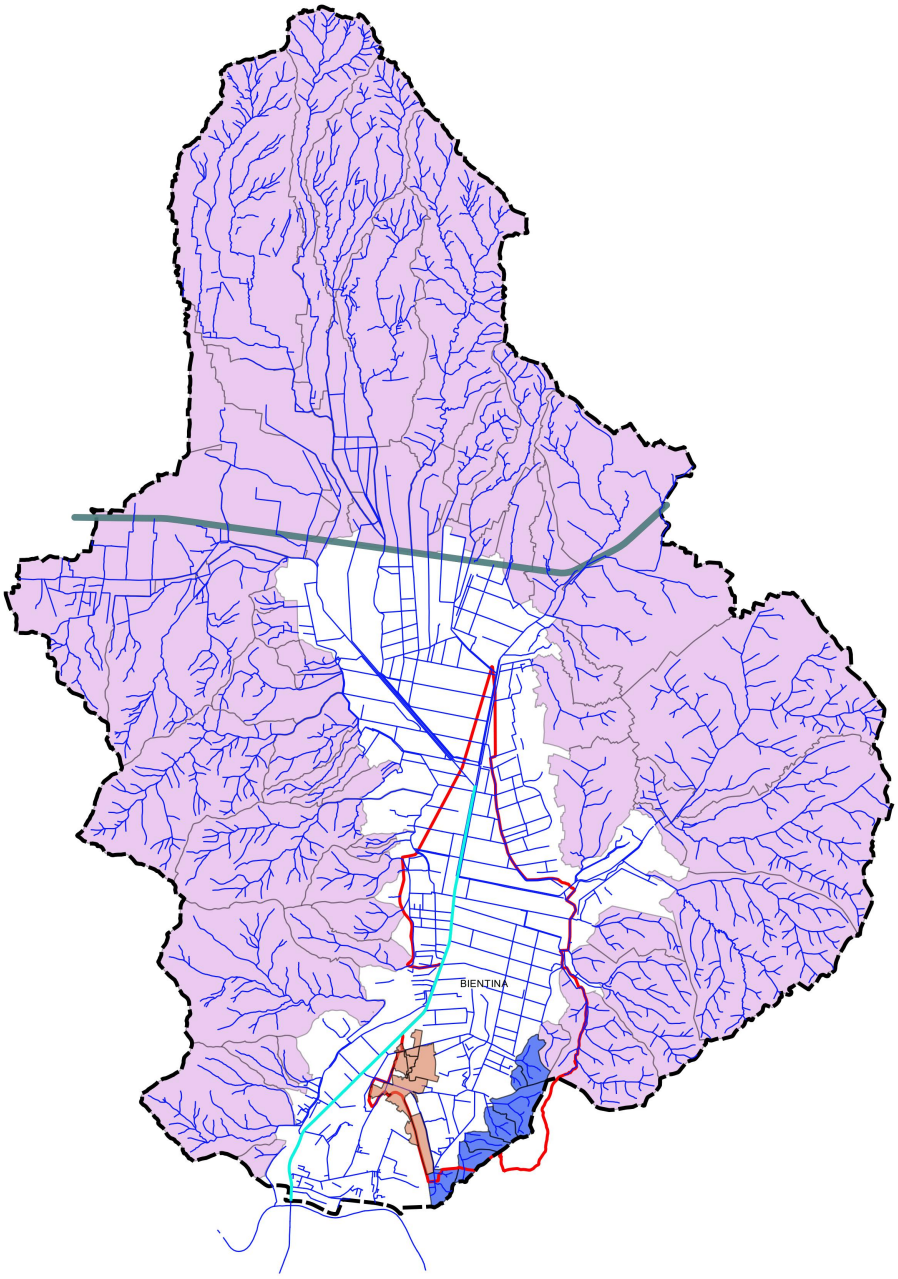


Fig. 12 – Suddivisione tra reticolo di acque alte e di acque basse sul bacino del Canale Emissario Bientina

Dalla figura precedente si può osservare come sul territorio comunale di Bientina insista prevalentemente un reticolo di acque basse.

Nel separare il reticolo di acque alte da quello di acque basse, che si sottolinea nuovamente essere un passaggio funzionale al lavoro che segue, si è reso necessario operare una semplificazione, imponendo un limite "geografico" in corrispondenza dell'autostrada A11, quando a monte ed a cavallo di essa, soprattutto nella parte Ovest e Nord/Ovest, è presente reticolo minore che drena la pianura di Capannori (bacino di monte del Canale Rogio, Rio Arpino, Rio del Frizzone). Al di là di ciò questa è da ritenersi una suddivisione ammissibile, come conferma anche il "vecchio" database della Regionalizzazione di ALTO, riportato anche in un elaborato facente parte dello studio idraulico per il R.U. del 2009, come mostra la successiva figura (reticolo di acque basse in azzurro).

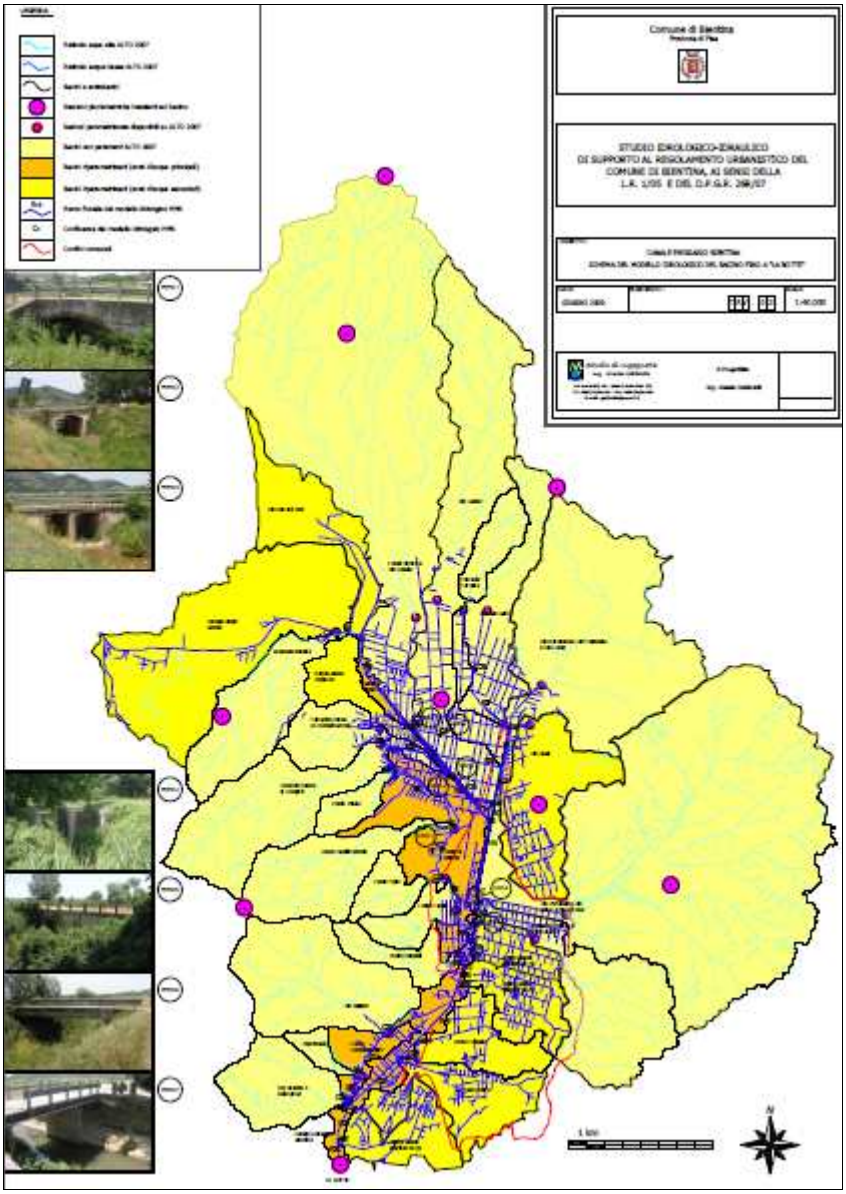


Fig. 13 – Tav. 2 dello studio idrologico-idraulico di supporto al R.U. del Comune di Bientina (2009)

La precedente Fig. 12 individua, in azzurro, anche i piccoli bacini collinari che insistono direttamente sul reticolo di fossi interferente con l'abitato di Bientina; infine sono riportati anche i bacini urbani, in marrone, serviti da pubblica fognatura.

Per quanto riguardai il reticolo di bonifica, si rileva la presenza di numerose opere ed impianti con funzione idraulica, finalizzati alla regimazione dei deflussi dell'intero Padule, con particolare riferimento alle aree più depresse; tali opere sono riportate anche negli elaborati del Piano di Classifica del Consorzio di Bonifica Toscana Nord (Carta delle Opere, Tav. 4.2).

La tavola **T.1 – Bacino e reticolo idrografico del Canale Emissario Bientina** allegata al presente lavoro individua tali opere, limitatamente a quelle appartenenti alla porzione di territorio modellata nei modelli idraulici di cui ai successivi Cap. 5 ("Modello Padule") e Cap. 7 ("Modello Bientina").

In particolare si segnala la presenza di **cateratte** (portelle con valvola a clapet e porte "vinciane"), poste prevalentemente alla confluenza degli affluenti di monte del Canale Emissario Bientina.

È presente anche un importante **sfioratore** per lo smaltimento delle acque della Fossa Nuova verso il Canale Rogio, posto lungo Via Fossanuova in prossimità del ristorante "La Baracca", Comune di Porcari.

Il Padule è inoltre servito da n. 3 **impianti di sollevamento**: si tratta dell'impianto idrovoro "Pollini", posto in prossimità del bivio per Orentano lungo la S.P. n. 3, in sinistra idraulica del Canale Emissario, dell'impianto idrovoro delle "Botronaie", posto in destra idraulica del Canale Emissario lungo Via della Tura, e dell'impianto idrovoro del "Puntone", posto in sinistra idraulica del Canale Emissario in Loc. Puntone nella piana a Nord-Est dell'abitato di Bientina.

Detti impianti di sollevamento consentono lo scarico del reticolo di acque basse e delle aree di ristagno verso il Canale Emissario Bientina di ampie porzioni del Padule, in destra ed in sinistra idraulica; i primi due impianti citati servono aree propriamente appartenenti al Padule, il terzo, quello del "Puntone", serve invece le aree poste valle della Via del Confine, quindi a valle del confine dell'ex Lago.

Di seguito sono mostrate alcune fotografie relative ad alcune delle opere idrauliche suddette.

Foto 1 – Porta "vinciana" scarico Fosso di Confine, o Fosso Zero, sinistra idraulica

Foto 2 – Portella scarico Fosso di Confine destra idraulica (frontale a porta Foto 1)

Foto 3 – Portella scarico Fosso della Presellina sinistra idraulica

Foto 4 – Portella scarico Fosso Emissarino sinistra idraulica

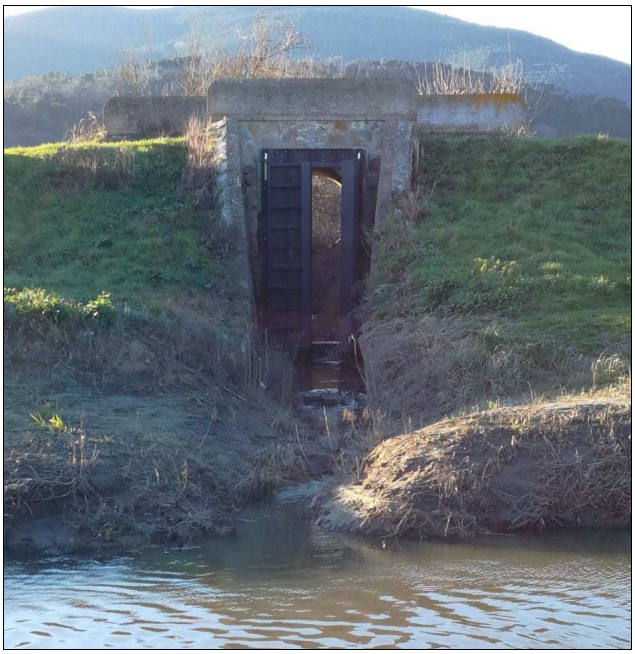


Foto 5 – Portella scarico fosso a valle dell'impianto delle "Botronaie, destra idraulica

Foto 6 – Sfioratore Fossa Nuova – Canale Rogio

Foto 7 – Impianto idrovoro "Pollini" Orentano

Di tutte le opere idrauliche presenti nell'area in esame la più importante è senza dubbio la "Botte", ovvero il sottoattraversamento del Fiume Arno realizzato a metà XIX per la definitiva bonifica del Padule.

Come anticipato, il funzionamento idraulico di questa imponente opera idraulica rappresenta un elemento determinante per le dinamiche del Canale Emissario Bientina, e quindi dell'intero reticolo del Padule.

La capacità di smaltimento della "Botte", costituita da due "canne" ad arco di lunghezza pari a circa 250 metri e luce pari a circa 12 mq ciascuna, è stata nuovamente indagata nell'ambito del presente, sulla scorta di nuovi rilievi e nuovi approfondimenti.

Di seguito sono mostrate alcune foto della "Botte" sia sul lato monte che sul lato di valle.

Foto 8 – La "Botte" lato monte

Foto 9 – La "Botte" lato valle

Foto 10 – La "Botte" lato valle

3.3 Il drenaggio delle aree urbane

Per la predisposizione dei modelli idrologici ed idraulici di dettaglio inerenti le parti urbanizzate del Comune di Bientina ("Modello Bientina") si è potuto fare riferimento anche alle informazioni circa il reticolo fognario.

Ciò ha consentito di definire le superfici scolanti delle aree urbane, calcolarne i contributi idrologici e introdurli nella modellazione idraulica nei punti corretti (in corrispondenza degli sfioratori), sia come idrogrammi puntuali che come idrogrammi diffusi.

I perimetri dei bacini urbani serviti dal sistema fognario sono riportati nella tavola **T.4 – Carta di sintesi del modello idrologico "Modello Bientina"** allegata. Maggiori dettagli circa le valutazioni idrologiche per l'area urbana sono rimandati al relativo capitolo.

Di seguito è semplicemente mostrato un estratto della rete fognaria a servizio del capoluogo.

Fig. 14 – Sistema fognario del Comune di Bientina (Acque Spa)

4. IDROLOGIA: IL "MODELLO PADULE"

In questo capitolo è descritta l'analisi idrologica del bacino del Canale Emissario Bientina, con particolare riferimento all'area del Padule. Questa parte rappresenta, unitamente alla modellazione idraulica del "Modello Padule" di cui al successivo capitolo, la fase più complessa del lavoro svolto, anche in termini di illustrazione stessa dei vari criteri e passaggi di calcolo.

La trattazione che segue si fonda sulle anticipazioni e le premesse dei capitoli precedenti, che risultano fondamenti per una più agevole lettura e comprensione dei contenuti del presente capitolo.

4.1 Approccio metodologico

4.1.1 Premessa

Innanzitutto appare opportuno riassumere e mettere un po' in ordine i concetti e le considerazioni dei capitoli precedenti che stanno alla base dell'approccio metodologico adottato nel presente lavoro per quanto attiene i calcoli idrologici sul bacino del Canale Emissario Bientina, con particolare attenzione al reticolo del Padule.

Come anticipato, infatti, **i calcoli comunemente idrologici sono, in questo caso, affiancati, ed in parte sostituiti, da calcoli tipicamente idraulici**.

E ciò è stato fatto al fine di **valutare in modo più appropriato l'effetto di laminazione del Padule**.

Si è fatto dunque ricorso, inizialmente, ad un modello idrologico per la stima degli idrogrammi idrologici relativi ai vari sottobacini di acque alte, ovvero i sottobacini di tutti i corsi d'acqua singolarmente afferenti al Padule e, più in generale, all'asta principale del Canale Emissario; questo costituisce la parte idrologica del cosiddetto "Modello Padule", e ne è dato conto nel presente capitolo.

Dopodiché si è analizzato, per il settore delle sole acque basse, compreso il Canale Emissario fino alla "Botte", il funzionamento del sistema mediante un modello idraulico, ricostruendo minuziosamente, sulla scorta delle informazioni disponibili, buona parte del reticolo di bonifica; questo costituisce la parte idraulica del cosiddetto "Modello Padule", di cui al Cap. 5.

Nella precedente Fig. 12 si fa riferimento alla suddivisione del reticolo del bacino complessivo in **reticolo naturale** e **reticolo di bonifica**.

I contributi idrologici propri del reticolo naturale sono valutati con il modello idrologico.

Le dinamiche del reticolo di bonifica, con riferimento al settore Nord del Padule fino alla confluenza tra Canale Emissario Bientina e Fosso di Confine, sono valutate con il modello idraulico.

I contributi idrologici dell'area del Padule sono introdotti come semplici precipitazioni all'interno del modello idraulico, previa stima delle perdite con metodologia omogenea con quella del modello propriamente idrologico.

La propagazione e l'accumulo all'interno del Padule sono simulate con il modello idraulico, e ciò ha consentito di:

1. Definire la massima portata "laminata" in ingresso al Canale Emissario Bientina (**idrogramma "realistico"**).
2. Definire le esondazioni ed i ristagni nell'area del Padule, da cui i relativi perimetri di aree allagate, battenti e velocità.

Questa scelta, come già anticipato, risponde all'esigenza di superare le incertezze circa la quantificazione dell'effetto laminativo del Padule, e quindi di evitare le approssimazioni adottate negli studi precedenti.

Come il modello idraulico del Padule (Cap. 5), anche il modello idrologico svolge una doppia funzione, ovvero quella di:

1. Individuare preliminarmente, grazie all'estensione della modellazione anche agli interbacini di acque basse interni al Padule, quale risultasse la durata di precipitazione capace di massimizzare l'idrogramma idrologico in ingresso al Canale Emissario Bientina (durata critica).
2. Fornire gli **idrogrammi idrologici** per tutti i bacini di acque alte per quella data durata critica da introdurre nel successivo modello idraulico.

Quindi con lo stesso modello idrologico si sono ricavati:

- idrogrammi idrologici dei bacini di acque alte (utilizzati nel modello idraulico);
- idrogrammi idrologici in testa al Canale Emissario (non utilizzati nel modello idraulico ma posti semplicemente a confronto per l'individuazione dello scenario critico).

Si fa presente che nello studio idrologico-idraulico del Regolamento Urbanistico comunale del 2009 al modello dell'Emissario è stata imposta, invece, la semplice condizione idrologica, salvo poi averla dovuta "correggere" perché ritenuta non realistica.

Su questo passaggio verte la vera differenza tra lo studio precedente e questo nuovo studio, che si caratterizza adesso per una complessità modellistica enormemente più grande; il tutto finalizzato alla ricerca di quell'idrogramma definito "realistico" in luogo del precedente idrogramma idrologico solo "qualitativamente laminato".

4.1.2 Il metodo di calcolo

L'analisi idrologica nel presente studio è stata affrontata con metodologia condivisa e di uso comune, e con approccio cautelativo.

E' stato fatto ricorso al metodo SCS, basato sul Runoff Curve Number, adottato sia per la depurazione delle piogge che per la trasformazione afflussi-deflussi.

Come solutore delle equazioni è stato utilizzato il software HEC HMS.

Per quanto riguarda gli aspetti pluviometrici, sono stati implementati i dati dello studio *Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme* (Regione Toscana, 2014), che fornisce i valori dei parametri a ed n delle Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica come *raster* a maglie di 1 kmq, elaborabili in ambiente Gis.

Di seguito è mostrato un esempio dei parametri delle L.S.P.P., relativo al parametro a per il tempo di ritorno duecentennale, con indicazione del bacino in esame e del confine comunale.

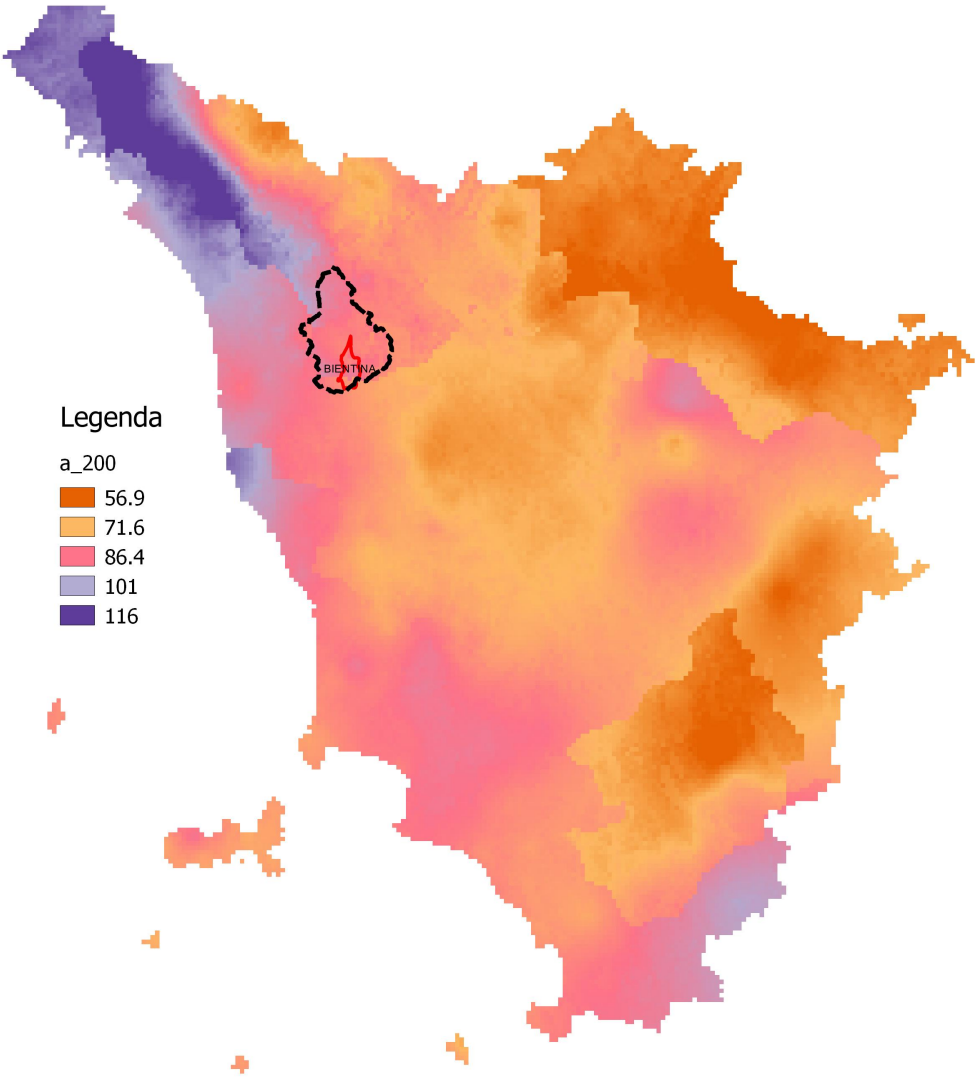


Fig. 15 – Distribuzione del parametro a delle L.S.P.P. sul territorio regionale

L'afflusso meteorico (altezza lorda di precipitazione) su un bacino di riferimento, per un dato tempo di ritorno e una data durata di pioggia, è stimato attraverso la seguente relazione:

$$h=a \bullet t^n \quad \textbf{(1)}$$

con a ed n caratteristiche dell'intero bacino e funzione del tempo di ritorno prescelto.

Considerato che la pubblicazione regionale fornisce i valori di a ed n sotto forma di dati discreti e diversi per ciascuna cella di 1 kmq, per definire l'altezza di precipitazione su un determinato bacino idrografico risulta necessario valutare la media delle singole altezze di precipitazione di ciascuna cella ricadente all'interno del bacino stesso.

Infatti non è proceduralmente corretto mediare sul bacino i coefficienti a ed n forniti dalla Regione, bensì mediare, sempre sul bacino, la relativa altezza di pioggia h, e successivamente, se necessario, procedere a ritroso e ricavare i relativi valori di a ed n per così dire "medi" e caratteristici del bacino.

Per questo motivo, per una gamma di durate di pioggia prese a campione (1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12 e 24 ore) e per la gamma di tempi di ritorno forniti dallo studio regionale (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni) sono state stimate, mediante il calcolatore di campi in ambiente Gis (in particolare è stato utilizzato il software *open source* QGis), le rispettive distribuzioni di altezze di pioggia.

La distribuzione delle altezze di precipitazione per tutte le combinazioni durata-tempo di ritorno anzidetta è stata calcolata su tutto il bacino del Canale Emissario Bientina.

Dopodiché si è passati a tracciare tutti i sottobacini di acque alte, e successivamente quelli di acque basse. Questa operazione è stata effettuata ricostruendo l'andamento delle linee spartiacque sia mediante la C.T.R. in scala 1:10.000 e/o in scala 1:2.000, laddove presente; per le porzioni più pianeggianti, ove non sono disponibili curve di livello, la definizione degli spartiacque è stata condotta esclusivamente sulla base del LIDAR.

Non sono stati utilizzati *tool* di creazione automatica dei bacini bensì tracciati manualmente uno ad uno.

La seguente figura mostra la suddivisione del bacino complessivo del Canale Emissario Bientina in sottobacini di acque alte (assimilati a bacini collinari o montani) e interbacini di acque basse (nell'area del Padule); questi sono mostrati rispettivamente in colore viola e *beige*.

In bianco è indicata la pianura del Canale Emissario a valle del Padule esclusa dal presente modello idrologico, e analizzata nel "Modello Bientina" di cui ai successivi Capp. 6 e 7.

Complessivamente sono stati definiti **n. 55 bacini di acque alte** (di superficie variabile tra 18 kmq e 16 ettari, di cui soltanto 10 presentano superficie superiore a 10 kmq). Questa suddivisione risponde all'esigenza di prevedere una maggiore discretizzazione del modello idrologico rispetto a quella degli studi precedenti, come richiesto in sede di coordinamento dal Distretto Appennino Settentrionale.

Oltre ai bacini di acque alte, l'area di pianura del Padule è stata ripartita in **n. 27 interbacini di acque basse** (di superficie variabile tra 8 kmq e 4 ettari, di cui soltanto 4 presentano superficie superiore a 3 kmq).

La superficie dei bacini di acque alte risulta pari a circa **243 kmq**, quella dei bacini di acque basse fino alla confluenza tra Canale Emissario e Fosso di Confine, o Fosso Zero (confine dell'ex Lago) risulta invece pari a circa **45 kmq**.

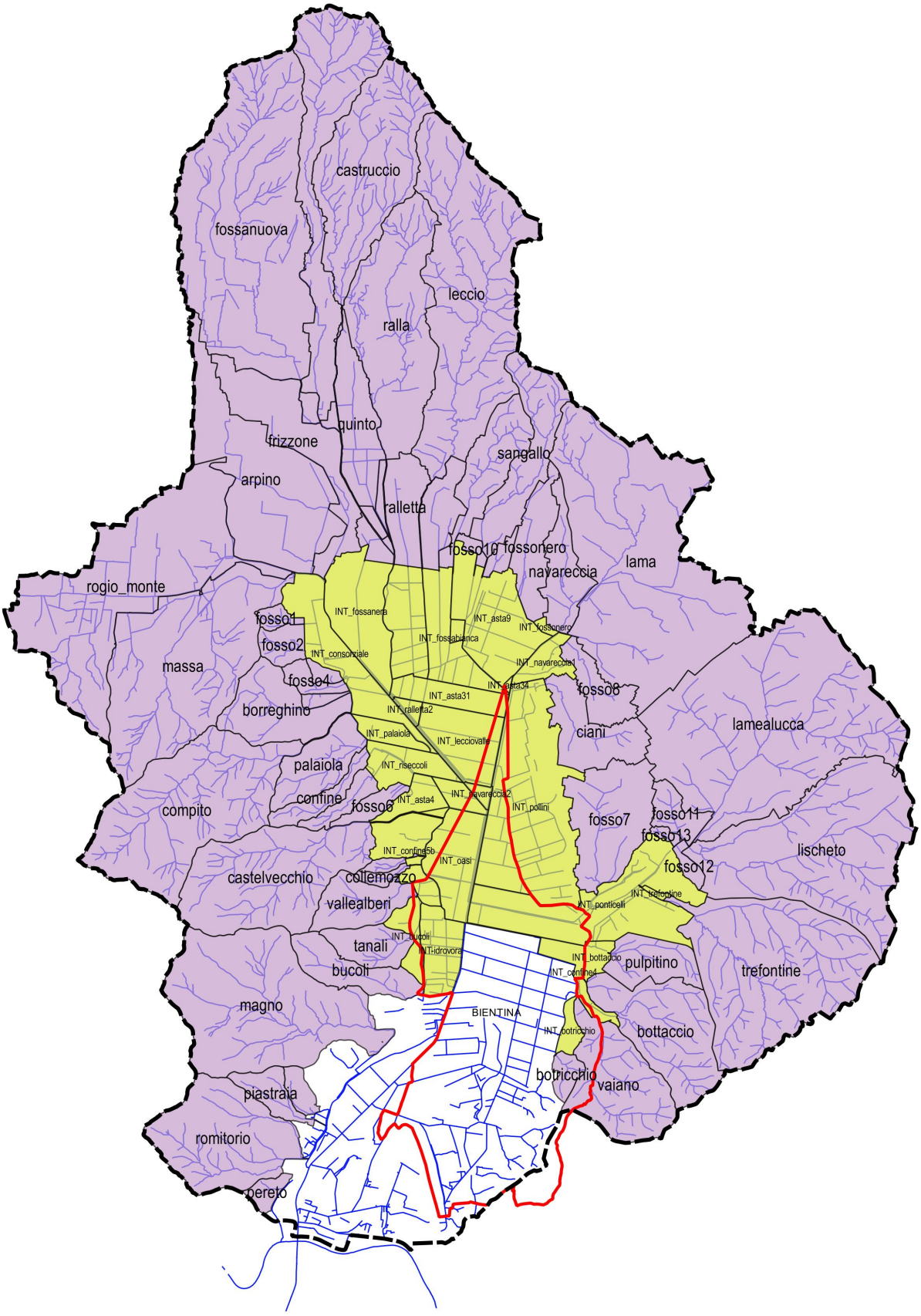


Fig. 16 – Sottobacini del modello idrologico

Per una migliore lettura, di seguito è mostrato un particolare della zona centrale del Padule di Fig. 16.

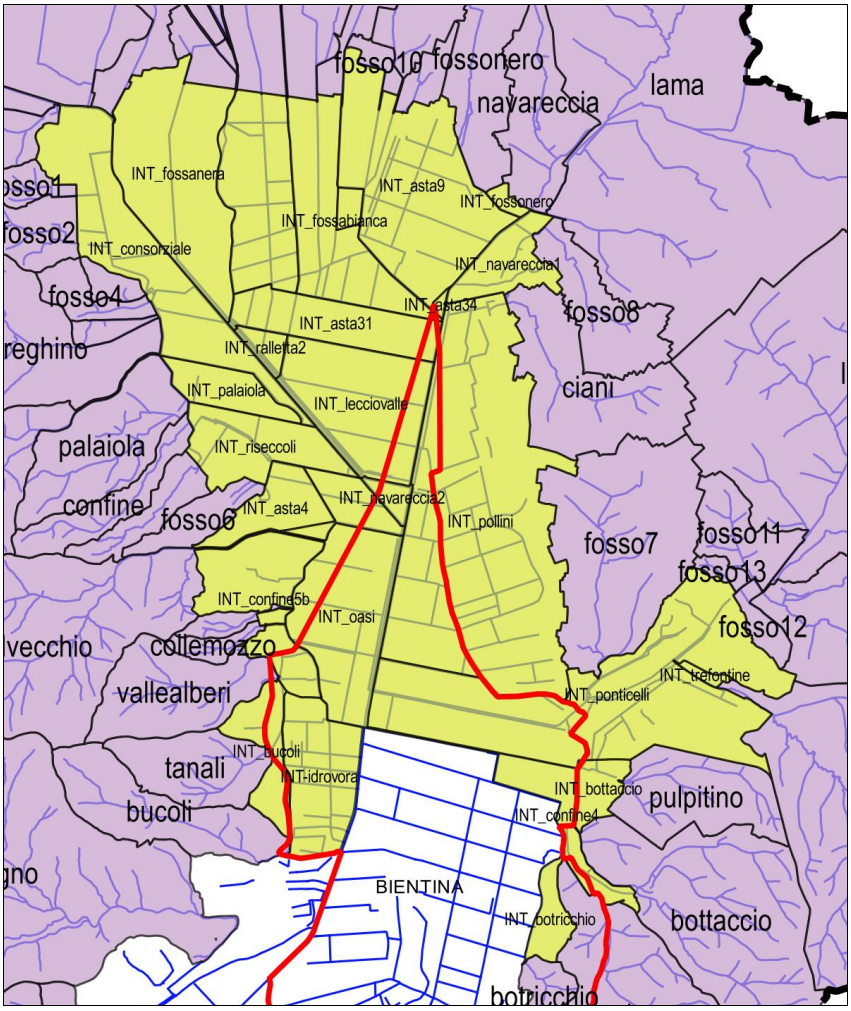


Fig. 17 – Particolare degli interbacini del modello idrologico ricadenti sull'area del Padule

Una volta tracciati i bacini è stato possibile definire anche la distribuzione delle altezze di precipitazione per tutte le combinazioni durata-tempo di ritorno su ciascuno di essi.

Definite le altezze di pioggia è stata calcolata la media su ciascuno bacino. Si specifica che per meglio approssimare gli *shape* dei bacini con i *raster* delle piogge, si è preliminarmente proceduto a ricampionare i *raster* originali di a ed n (maglia di 1 kmq) ad una nuova maglia di 100 mq).

Per gli interbacini dell'area del Padule la media delle altezze di pioggia è stata fatta a livello di intera superficie e non di singolo interbacino.

A questo punto, disponendo delle altezze di pioggia h per TR30 e TR200 in funzione delle varie durate di pioggia t (sono state analizzate le **durate: 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 24, 36 e 48 ore**) mediante un procedimento di regressione lineare sul piano logaritmico $log(h) – log(t)$, sono stati ottenuti i valori dei coefficienti a ed n caratteristici di tutti i sottobacini in esame, ovvero i 55 bacini per così dire di acque alte, e dell'unico macro-bacino dell'area del Palude, composto da tutti gli interbacini con prefisso "INT" di cui sopra, con la seguente relazione:

$$log(h)=log(a)+n \bullet log(t) \quad \textbf{(2)}$$

L'afflusso meteorico è stato poi ragguagliato alla superficie del bacino secondo il procedimento di seguito descritto.

All'input meteorico è stato applicato un coefficiente moltiplicativo di ragguaglio areale, Kr, che generalmente aumenta con l'aumentare della durata di pioggia e diminuisce con l'aumentare della superficie del bacino rispetto al quale è calcolato.

Per pervenire a questo valore di Kr è stata utilizzata la seguente relazione:

$$Kr = 1- exp\ (-\alpha t^{\beta})+exp(-\alpha t^{\beta}-\gamma A) \quad \textbf{(3)}$$

in cui t è la durata di precipitazione [h], A la superficie del bacino [kmq], mentre il parametro α è posto uguale a $0.036 \bullet a'$, dove a' rappresenta il coefficiente della curva di possibilità pluviometrica in forma trinomia, il parametro $\beta=0.25$ ed il parametro $\gamma=0.01$.

E' evidente come vi sia necessità, per la valutazione del coefficiente di ragguaglio areale secondo la precedente formulazione, di dover stimare i parametri delle linee segnalatrici in forma trinomia, ovvero:

$$h=a' \times t^{n'} \times Tr^{m'} \quad \textbf{(4)},$$

in cui sono presenti i parametri a', n' e m', e con Tr si intende il tempo di ritorno, espresso in anni.

Ponendo in campo logaritmico la relazione trinomia delle linee segnalatrici **(4)** si ottiene la seguente relazione:

$$log(h)=log(a')+n' \bullet log(t)+m' log(Tr) \quad \textbf{(5)}$$

Essendo $n=n'$, e tenuto conto della formula binomia in campo logaritmico $log(h)=log(a)+n \bullet log(t)$, per sostituzione si ottiene

$$log(a)=log(a')+m' log(Tr) \quad \textbf{(6)}$$

Mediante regressione lineare applicata alla precedente relazione, si possono dunque determinare i parametri a' ed m' della curva trinomia.

Così facendo, per il bacino oggetto di valutazione, si può ottenere il relativo parametro a' necessario al calcolo, tramite la precedente formula del Kr **(3)**.

In un modello con più input idrologici, la valutazione del coefficiente di ragguaglio da applicare al singolo input non può essere però eseguita direttamente applicando la formula di cui sopra **(3)**, bensì è necessario dapprima calcolare i valori di Kr per il bacino di monte e quello di valle (intero bacino), e successivamente calcolando il singolo Kr dell'interbacino, o sottobacino, mediando il coefficiente in funzione del peso della superficie del bacino di monte più la superficie dell'interbacino rispetto alla superficie del bacino di valle, al fine di mantenere inalterato il valore di Kr del bacino di valle, ovvero applicando la seguente relazione:

$$Kr_{A_i} = \frac{\left[Kr_{A_M + A_i\, pesato} \cdot \left(A_M + A_i \right) - Kr_M \cdot A_M \right]}{A_i}, \quad \textbf{(7)}$$

dove

Kr_{A_i} = coefficiente di ragguaglio dell'interbacino i-esimo di superficie A_i,

Kr_M = coefficiente di ragguaglio del bacino di monte (sezione di apertura del modello), di superficie A_M, calcolato mediante **(3)**

e $Kr_{A_M+A_i\,pesato} = (\frac{Kr_V \cdot A_V - Kr_M \cdot A_M}{A_V - A_M}) \cdot (\frac{A_M + A_i}{A_V})$, **(8)**

in cui

Kr_V = coefficiente di ragguaglio dell'intero bacino (sezione di chiusura del modello), di superficie A_V, calcolato mediante **(3)**.

Dal momento che la quasi totalità dei bacini di acque alte affluisce al Padule o al Canale Emissario a valle della sua origine (confluenza tra Canale Rogio e Canale della Navareccia), si è inteso applicare il ragguaglio areale definendo **n. 4 scenari idrologici distinti**, ovvero ipotizzando 4 combinazioni di precipitazione sul bacino complessivo:

A. **Scenario A**
   Precipitazione più intensa sui bacini posti a Nord del tracciato autostradale, e meno intensa sul resto del bacino di valle.
B. **Scenario B**
   Precipitazione più intensa sui bacini posti a monte della confluenza tra Canale Rogio e Canale della Navareccia (inizio Canale Emissario Bientina), e meno intensa sul resto del bacino di valle.
C. **Scenario C**
   Precipitazione più intensa sui bacini posti a monte della confluenza tra Canale Emissario Bientina e Fosso di Confine, o Fosso Zero (confine dell'ex Lago di Bientina), e meno intensa sul resto del bacino di valle.
D. **Scenario D**
   Precipitazione omogenea sul bacino complessivo del Canale Emissario Bientina) chiuso alla "Botte".

Detti scenari hanno lo scopo di massimizzare gli idrogrammi idrologici in corrispondenza dei seguenti punti o sezioni:

a. A monte dell'ingresso al Padule.
b. Alla sezione di testa del Canale Emissario Bientina.
c. Alla sezione di chiusura dell'ex Lago.
d. Alla sezione di chiusura del Canale Emissario Bientina (la "Botte).

La seguente figura mostra la rappresentazione areale dei 4 scenari idrologici suddetti, di cui la porzione in verde individua il bacino di monte, su cui sono massimizzate le piogge (con coefficiente di ragguaglio "proprio", come da precedenti formulazioni), e la porzione in celeste individua il bacino di valle, su cui le piogge insiste una minor intensità di pioggia.

La distribuzione areale per lo scenario A prevede un bacino di monte di superficie pari a circa 127 kmq, per lo scenario B il bacino di monte presenta una superficie pari a circa 181 kmq, per lo scenario C di circa 268 kmq, per lo scenario D la pioggia è supposta di pari intensità su tutta la superficie del bacino complessivo (320 kmq circa).

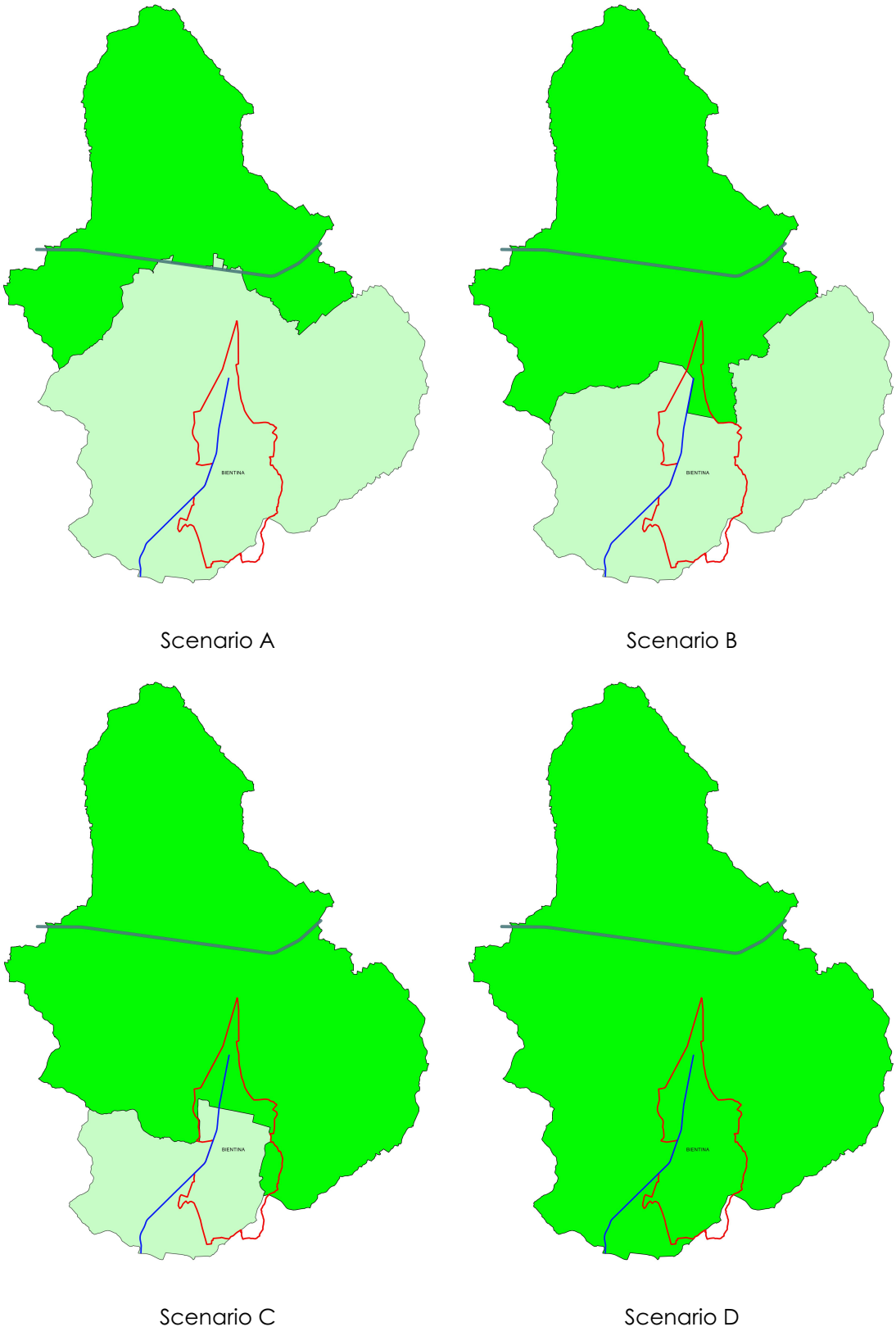


Fig. 18 – Distribuzione areale delle precipitazioni nei 4 scenari idrologici ipotizzati

Ai fini del presente lavoro gli scenari di precipitazione di maggiore interesse sono rappresentati dagli scenari **B** e **C**, che massimizzano rispettivamente le portate idrologiche del Canale Emissario Bientina in testa alla sua asta (sez. 1), alla confluenza tra Canale Rogio e Canale della Navareccia, e ad una sezione intermedia (sez. 5), alla confluenza con il Fosso di Confine.

Alla luce delle dimensioni del bacino in esame, **nel presente lavoro l'input meteorico è schematizzato mediante ietogrammi rettangolari**.

Come anticipato, la trasformazione tra pioggia "lorda" e pioggia "efficace", o netta, è stata effettuata con il metodo *SCS*, mediante l'implementazione del parametro del *Runoff Curve Number* (*CN*).
I valori del *CN* sono funzione della tessitura e dell'umidità iniziale del suolo, nonché del suo uso e/o copertura vegetale.

Ai singoli bacini in esame è assegnato un valore caratteristico di *CN*, secondo la procedura di seguito descritta.

Il metodo SCS stima la precipitazione netta come funzione della precipitazione lorda cumulata secondo la seguente relazione:

$$P_n = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \textbf{(9)}$$

in cui P_n rappresenta la precipitazione netta al tempo t, P la cumulata lorda al medesimo tempo, e I_a la perdita iniziale (dovuta ad intercettazione e detenzione superficiale, e infiltrazione fino all'inizio dello scorrimento, mm).
S rappresenta invece la cosiddetta ritenzione potenziale, ovvero il massimo volume specifico d'acqua (mm) che il terreno può trattenere in condizioni di saturazione, ed è calcolato mediante la seguente relazione:

$$S = 25.4 \bullet [(1000/CN) - 10] \quad \textbf{(10)}$$

in cui ritroviamo proprio il valore del *Curve Number* caratteristico del bacino.
Anche il valore di I_a è funzione del *CN*, secondo la relazione:

$$I_a = 0.1 \bullet S \quad \textbf{(11)}$$

Si osserva che, cautelativamente, è stato adottato il valore 0.1 in luogo del più consueto valore 0.2, limitando quindi le perdite per intercettazione iniziale e infiltrazione.

Ad ogni intervallo di tempo t, la precipitazione netta P_n coincide con il valore calcolato mediante la precedente formula solo per $P > I_a$; in caso contrario, ovvero per $P \leq I_a$, P_n sarà pari a zero.
Per quanto detto, l'unico coefficiente da cui è fatta dipendere la precipitazione netta, ad ogni intervallo di tempo, è proprio il *Curve Number*.

Per la valutazione del *CN* caratteristico di ogni singolo bacino in esame si è proceduto come segue.

Innanzitutto occorre specificare che il *CN* varia in funzione delle caratteristiche di permeabilità del terreno ed uso e copertura del suolo, così come indicato nella seguente tabella.

Corine LIVELLO 3	SCS-CN per diversi HSG				Rif. USDA 1986
	A	B	C	D	
111 - Tessuto urbano continuo	89	92	94	95	Commercial and business (85% imp.)
112 - Tessuto urbano discontinuo	77	85	90	92	1/8 acre or less (town houses) (65% imp.)/small>
121 - Unità industriali o commerciali	81	88	91	93	Industrial (72% imp.)
122 - Reti di strade e binari e territori associati	98	98	98	98	Paved parking lots, roofs, driveways, etc.
123 - Aree portuali	98	98	98	98	Paved parking lots, roofs, driveways, etc.
124 - Aeroporti	98	98	98	98	Paved parking lots, roofs, driveways, etc.
131 - Luoghi di estrazioni di minerali	76	85	89	91	Gravel (including right of way)
132 - Discariche	81	88	91	93	Industrial (72% imp.)
133 - Luoghi di costruzione	77	86	91	94	Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation)
141 - Aree di verde urbano	49	69	79	84	Fair condition (grass cover 50 to 75%)
142 - Strutture di sport e tempo libero	68	79	86	89	Poor condition (grass cover <50%)

Tab. 1.1 – Valori del *CN* da "Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC" (Accordo di collaborazione scientifica tra la R.T. e Università di Firenze, 2014).

211 - Seminativi non irrigati	61	73	81	84	Contoured (C)
212 - Suolo permanentemente irrigato	67	78	85	89	Straight row (SR)
213 - Risaie	62	71	78	81	Contoured & terraced (C&T)
221 - Vigneti	76	85	90	93	Crop residue cover
222 - Frutteti e frutti minori	43	65	76	82	Woods—grass combination (orchard or tree farm)
223 - Oliveti	43	65	76	82	Woods—grass combination (orchard or tree farm)
231 - Pascoli	49	69	79	84	Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing.
241 - Colture annuali associate a colture permanenti	61	73	81	84	Small grain
242 - Coltivazione complessa	61	73	81	84	Small grain
243 - Suoli principalmente occupati dall'agricoltura	61	73	81	84	Small grain
244 - Aree di agro-selvicoltura	43	65	76	82	Small grain
311 - Foreste a latifoglie	36	60	73	79	Woods
312 - Foreste a conifere	36	60	73	79	Woods
313 - Foreste miste	36	60	73	79	Woods
321 - Prateria naturale	49	69	79	84	Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing.
322 - Lande e brugheria	49	69	79	84	Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing.
323 - Vegetazione sclerofila	35	56	70	77	Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element
324 - Transizione suolo boscoso/arbusti	35	56	70	77	Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element
331 - Spiagge, dune e piani di sabbia	46	65	77	82	12% imp.
332 - Roccia nuda	96	96	96	96	Artificial desert landscaping
333 - Aree scarsamente vegetate	63	77	85	88	Natural desert landscaping (pervious area only)
334 - Aree bruciate	63	77	85	88	Natural desert landscaping (pervious area only)
335 - Ghiacciai e nevi perenni	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies
411 - Paludi interne	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies
412 - Torbiere	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies
421 - Paludi di sale	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies
422 - Saline	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies
423 - Piani intertidali	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies
511 - Corsi d'acqua	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies
512 - Corpi d'acqua	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies
521 - Lagune costiere	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies
522 - Estuari	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies
523 - Mare	98	98	98	98	Impervious surfaces, water bodies

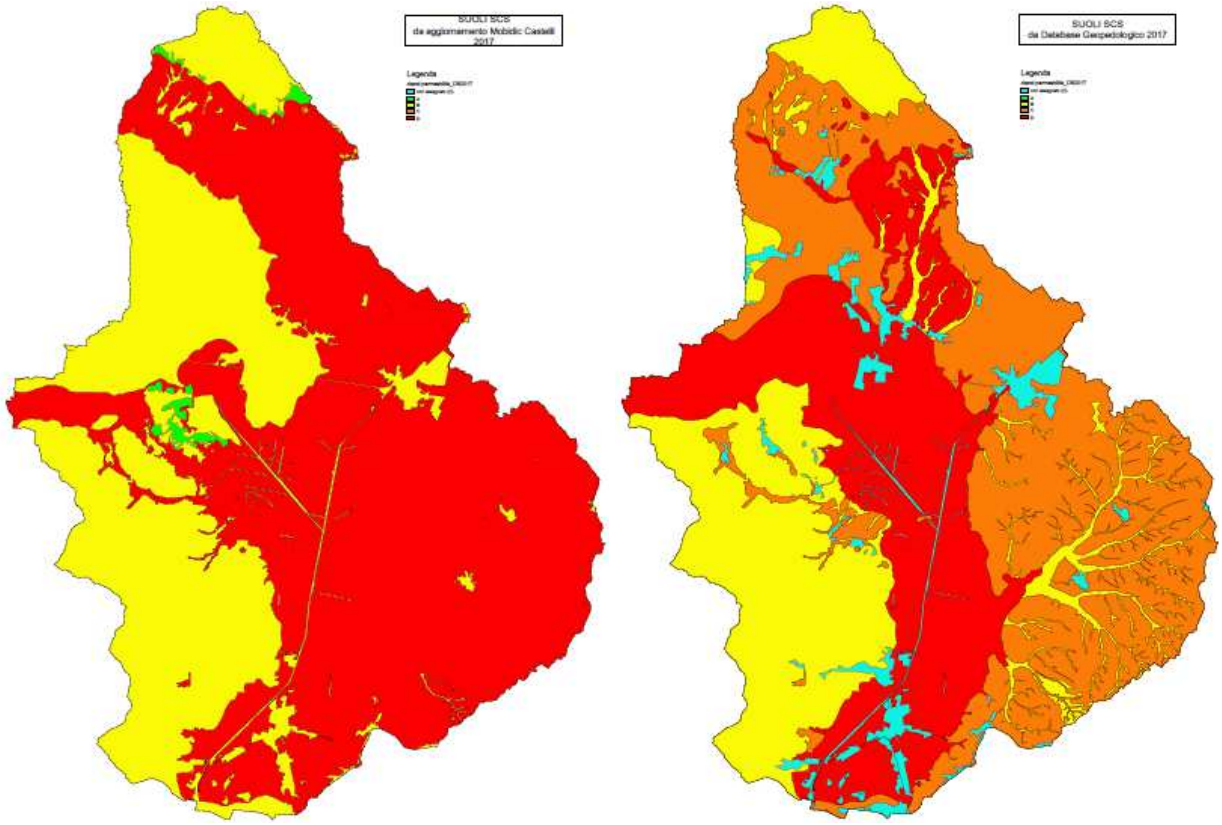
Tab. 1.2 – Valori del *CN* da "Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC" (Accordo di collaborazione scientifica tra la R.T. e Università di Firenze, 2014).

Il metodo SCS suddivide i suoli in 4 gruppi (dal gruppo A, suolo molto permeabile, al gruppo D, suolo quasi impermeabile), ed "incrocia" tali valori con le caratteristiche di uso e copertura dei suoli.

Per la scelta circa la classificazione dei suoli sui bacini in esame sono state valutate due differenti fonti.

- Classi dei suoli di cui al Database *Suoli_Toscana.shp* ("Implementazione di modello idrologico distribuito per il territorio toscano", prof. Castelli, aggiornamento 2017);
- Classi dei suoli di cui la Database Geopedologico (Regione Toscana, 2017).

La seguente figura mette a confronto la distribuzione delle 4 classe di suolo sul bacino del Canale Emissario Bientina rispetto ai due Database appena citati.



Database "Suoli_Toscana.shp" (Prof. Castelli) Database Geopedologico regionale

Fig. 19 – Confronto tra la distribuzione delle classi di suolo del metodo *SCS* rispetto ai due Database regionali consultati

In Fig. 19 le 4 classi sono individuate come segue:

- Colore verde: Classe A
- Colore giallo: Classe B
- Colore arancione: Classe C
- Colore rosso: Classe D
- Colore azzurro (solo in DB Geopedologico): aree urbanizzate, poste in Classe D.

Sentito anche il parere del Geol. Fabio Mezzetti, professionista incaricato dal Comune di Bientina per le indagini geologiche e sismiche e profondo conoscitore del territorio, si è optato per utilizzare le classi di cui al Database Geopedologico regionale, che appaiono più discretizzate e capaci di rappresentare meglio la permeabilità dei suoli dei bacini in esame, soprattutto per quanto riguarda la porzione ricadente sulle Colline delle Cerbaie.

Per la classificazione dell'uso del suolo si è invece fatto riferimento al Database regionale di Uso e Copertura del Suolo (UCS 2013), che, sul bacino in esame, mostra la seguente distribuzione.

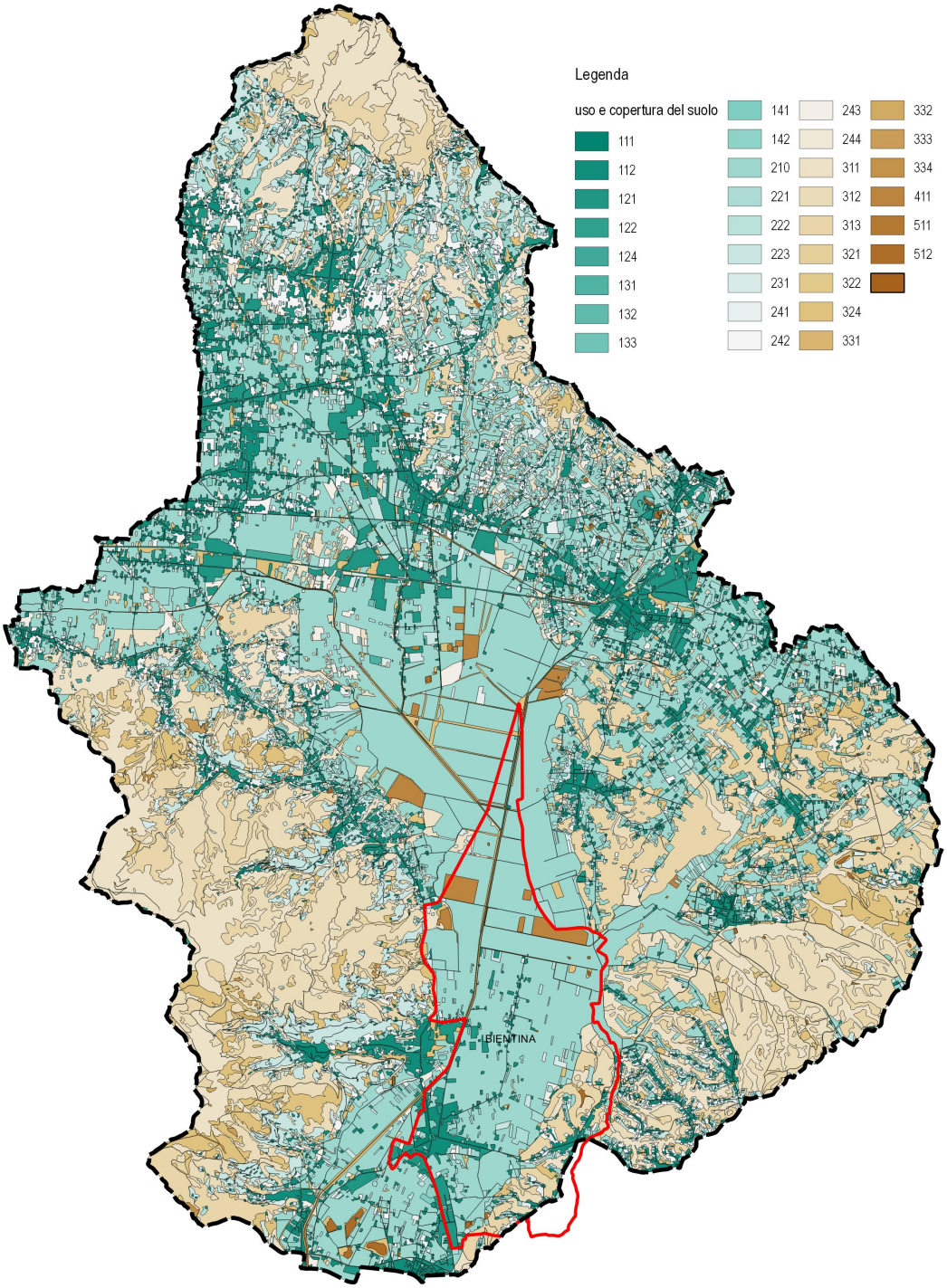


Fig. 20 – Uso del suolo sul bacino del Canale Emissario Bientina da U.C.S. (Regione Toscana, 2013)

Incrociando i dati mediante di classe dei suoli e uso del suolo di sui alle precedenti Fig. 19 e 20 secondo il criterio di Tab. 1 si sono pertanto ricavati i relativi valori medi di *CN* per tutti i bacini di studio.

Questi valori si riferiscono però al *CN II* (condizioni di media umidità del suolo), pertanto è stata implementata la seguente formulazione:

$$CN(III) = \frac{23\,CN(II)}{10+0.13CN(II)} \quad \textbf{(12)}$$

ed ottenuti i valori finali di *CN III* (condizioni di elevata umidità del suolo) per i bacini in esame, come mostrato nella successiva Fig. 21.

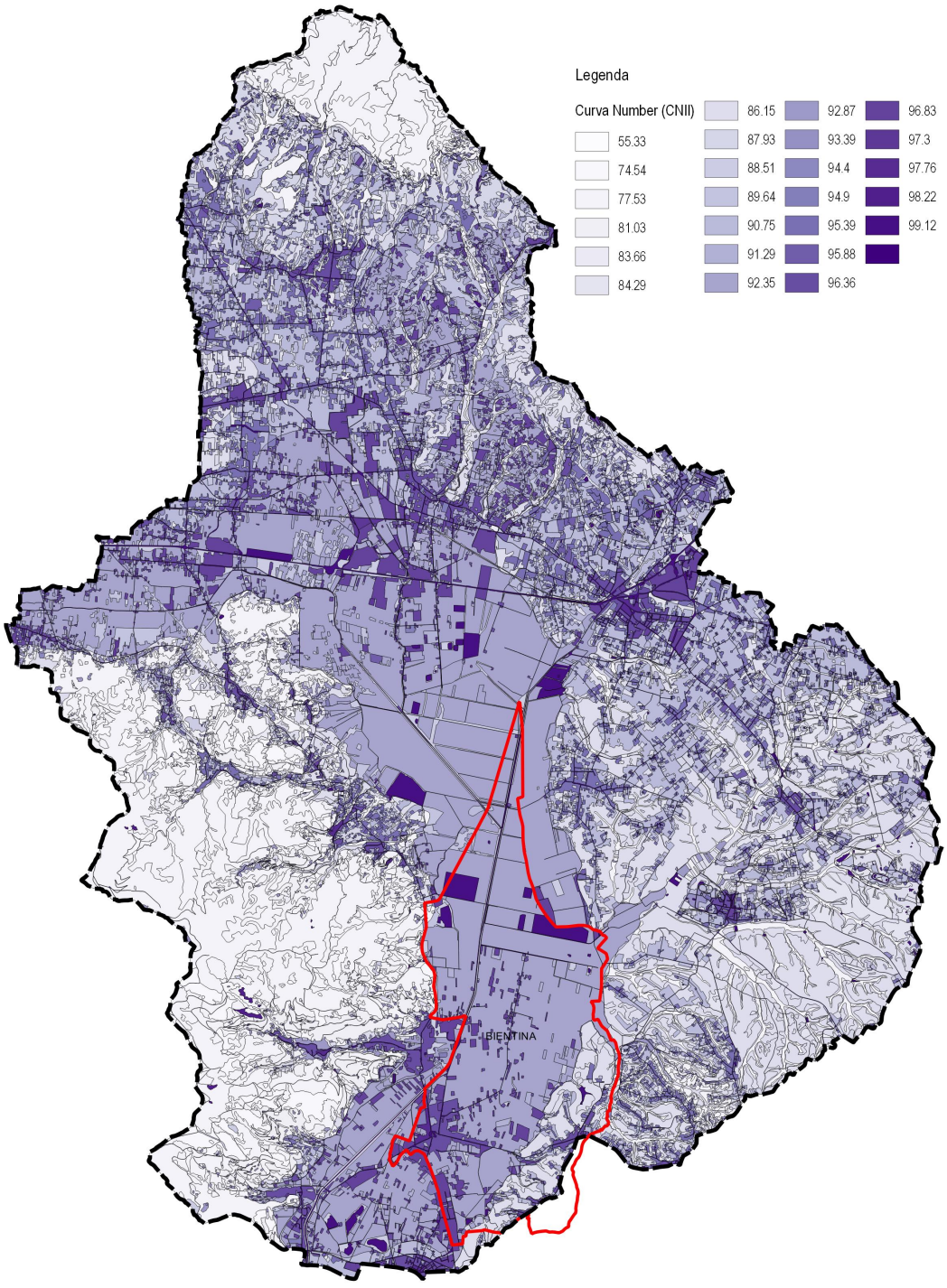


Fig. 21 – Distribuzione dei valori del *Curve Number* (*CN III*) sul bacino del Canale Emissario Bientina

Applicando dunque le precedenti **(9) (10) (11)** mediante apposito modello idrologico con HEC HMS a partire da un **afflusso meteorico di forma rettangolare**, è stata calcolata la precipitazione netta su ciascun bacino.

Per la trasformazione da afflussi meteorici a deflussi si è fatto ricorso sempre al metodo SCS, che si basa sull'applicazione dell'idrogramma unitario adimensionale.

Esso è rappresentato nella seguente figura.

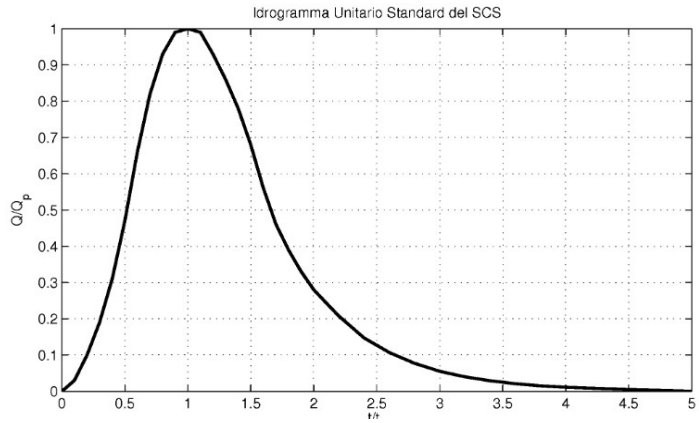


Fig. 22 – Idrogramma unitario adimensionale SCS

Il tempo di picco di detto idrogramma è funzione del tempo di ritardo T_l, che a sua volta è legato al tempo di corrivazione T_c del bacino, secondo la seguente relazione:

$$T_l = 0.6\ T_c \quad \textbf{(13)}$$

Il calcolo dei tempi di corrivazione di ciascun bacino è stato eseguito ponendo a confronto numerose formulazioni empiriche disponibili in letteratura:

SCS

$$T_c = 0{,}095 \cdot L_{max}^{\ 0{,}8} \cdot (1000/CN\text{-}9)^{0.7} \cdot i_bac_{\%}^{\ -0{,}5} \quad \textbf{(14)}$$

PEZZOLI

$$T_c = 0{,}55 \cdot L \cdot i_asta_{\%}^{\ -0{,}5} \quad \textbf{(15)}$$

PUGLISI

$$T_c = 6 \cdot L^{\ 2/3} \cdot (H_{max} - H_0)^{\ -1/3} \quad \textbf{(16)}$$

FERRO

$$T_c = 0{,}675 \cdot A^{\ 0{,}5} \quad \textbf{(17)}$$

GIANDOTTI

$$T_c = (4 \cdot A^{\ 0.5} + 1.5 \cdot L_{max}) / (0{,}8 \cdot \Delta H_{mean0}^{\ 0{,}5}) \quad \textbf{(18)}$$

KIRPICH

$$T_c = (0{,}0662 \cdot L_{max}^{\ 0.77} \cdot i_perc_{max\%}^{\ -0{,}385} \quad \textbf{(19)}$$

in cui L_{max} (km) rappresenta la massima distanza percorsa dall'acqua, L (km) la lunghezza dell'asta principale, A (kmq) la superficie del bacino, i_perc_{max}, $i_asta_{\%}$ e $i_bac_{\%}$ rispettivamente le pendenze medie, espresse in percentuale, della massima distanza percorsa dall'acqua, dell'asta principale e del bacino, H_{max} e H_0 (m s.l.m.) rispettivamente l'altitudine massima del bacino e l'altitudine alla sezione di chiusura, e ΔH_{mean0} (m) l'altezza media sulla sezione di chiusura.

Per la determinazione dei tempi di corrivazione secondo tutte le precedenti formulazioni è stata avviata un'attenta analisi geomorfologica dei bacini, attraverso la quale sono stati acquisiti i valori di tutti parametri necessari.

I vari tempi di corrivazione sono stati posti a confronto e ne è stata valutata anche la media.

La formulazione prescelta per il calcolo del tempo di corrivazione è quella fornita dal metodo *SCS* (14) stesso, in quanto ha mostrato valori meno "oscillanti" e più prossimi alla media, nonché garantito il rispetto delle condizioni di portata specifica (mc/kmq) suggerita dal Prof. Castelli nell'ambito del proprio studio a supporto del Piano Strutturale Intercomunale dell'Unione dei Comuni della Valdera (vedi paragrafo successivo).

Come anticato, la formulazione proposta dal *Soil Conservation Service* per il calcolo del tempo di corrivazione è la seguente:

$$T_c = 0.095\ (L_{max}^{0.8} \cdot ((1000/CN)-9)^{0.7})/I_{\%}^{0.5} \qquad \textbf{(14)}$$

in cui compare il parametro L_{max} (km) che rappresenta la lunghezza del massimo percorso compiuto dall'acqua all'interno del bacino e il parametro $I_{\%}$ che rappresenta la pendenza media.

Pertanto, per determinare il tempo di corrivazione di ciascun bacino è stato definito il massimo percorso e ricavata la pendenza media (quest'ultima elaborata in ambiente Gis a partire dai dati LIDAR, e, ove non presente, della C.T.R.).

A questo punto, sempre mediante l'ausilio del software HEC HMS, è stata eseguita la trasformazione afflussi-deflussi secondo il metodo dell'idrogramma unitario SCS e sono stati stimati gli idrogrammi di piena per un set di durate di precipitazione (0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 24, 36 e 48 ore) ed i tempi di ritorno pari a 30 e 200 anni.

Nel modello idrologico con HEC HMS si è reso necessario introdurre anche un'ampia serie di *reach*, ovvero aste che simulano il trasferimento tra nodo e nodo del modello; complessivamente sono stati definitivi **n. 75 *reach***, per alcuni bacini "compositi" di collina (es. Fossa Nuova e Rio Ponticelli), ma soprattutto per la parte degli interbacini del Padule.

Di seguito è mostrato un esempio di articolazione tra bacini (*subbasin*), aste (*reach*) e nodi (*junction*, se intermedi, o *sink*, se in uscita) del modello idrologico.

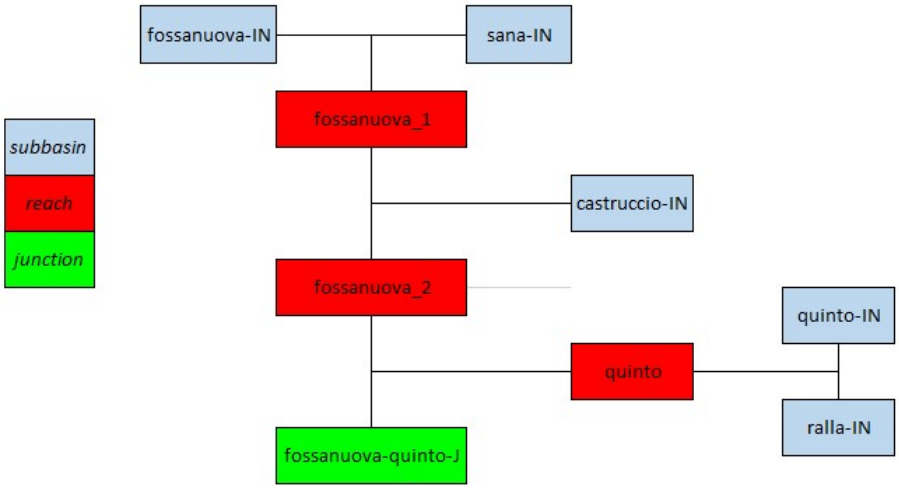


Fig. 23 – Schema idrologico del sottobacino della Fossa Nuova a monte dell'ingresso al Padule

Per la simulazione del trasferimento dell'onda di piena attraverso i *reach* è stato adottato il metodo di Muskingum-Cunge.

Per la sua applicazione il software HEC HMS richiede l'introduzione dei seguenti dati:

- Lunghezza dell'asta (m)
- Pendenza dell'asta (%)
- Geometria tipo della sezione

- Scabrezza della sezione (n di Manning, $m^{1/3}/s$)
- Celerità (m/s).

Per ciascuna delle n. 75 aste del modello idrologico è stata ipotizzata una sezione tipo, di forma trapezia, analizzando attraverso i dati LIDAR le caratteristiche geometriche; è stata calcolata anche la pendenza e la lunghezza di ogni asta, e assegnato il valore di scabrezza *n* di Manning pari a 0.035 $m^{1/3}/s$.

Per quanto riguarda il calcolo della celerità si è fatto riferimento a quanto suggerito dallo studio "Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC" (Accordo di collaborazione scientifica tra la R.T. e Università di Firenze, Prof. Castelli, 2014).
La celerità è valutata secondo il seguente criterio:

$$c = 0.95 - 6.88 \cdot 10^{-5} \cdot A_{monte} + 0.5 \cdot \frac{\omega}{\omega_{max}}$$

dove

c= celerità dell'onda di piena nel tratto [m/s]

Amonte= area del bacino a monte [km2]

w = ordine di Strahler [-]

wmax = ordine massimo di Strahler del reticolo rappresentato

Fig. 24 – Metodo di calcolo della celerità

Pertanto ogni asta è stata gerarchizzata secondo Strahler, e quindi introdotto anche il parametro c, celerità, nel modello idrologico.

La tavola **T.2 – Carta di sintesi del modello idrologico "Modello Padule"** riporta su cartografia la ripartizione di tutti i bacini in esame ed individua, con la medesima sigla o dicitura, tutti gli elementi del presente modello idrologico. Tale elaborato sostituisce la schermata del programma, che risulta decisamente poco leggibile, come mostra la seguente figura.

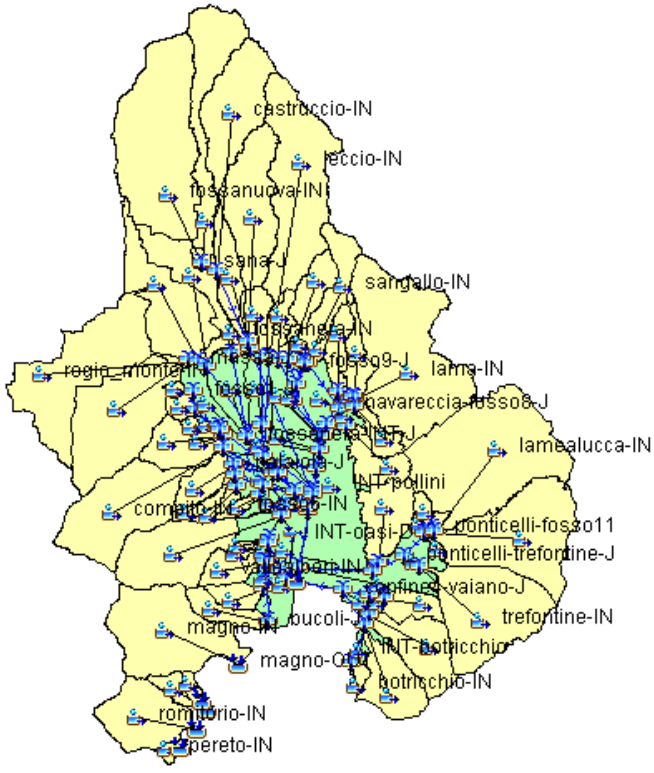


Fig. 25 – Schema del modello idrologico di HEC HMS "Modello Padule"

4.2 Modello idrologico del Padule e del Canale Emissario Bientina

In questo paragrafo sono riportati i valori di tutti i parametri pluviometrici e geomorfologici stimati ed applicati nelle simulazioni idrologiche del "Modello Padule" con il software HEC HMS.

Sono inoltre analizzati i risultati del modello e sviluppate opportune considerazioni, funzionali alla trattazione successiva.

4.2.1 Parametri del modello

In questo paragrafo sono riportati, mediante una serie di tabelle riepilogative, tutti i parametri utilizzati nel modello idrologico secondo l'approccio metodologico di cui al Par. 4.1.

Per l'individuazione dei bacini si deve fare riferimento alla tavola **T.2 – Carta di sintesi del modello idrologico "Modello Padule"** allegata.

Bacini	*n*	*a*	Bacini	*n*	*a*
arpino	0.3095	89.1030	fosso9	0.3028	83.3151
bientina	0.2915	85.6424	fossonero	0.2947	83.5344
borreghino	0.3161	84.5497	frizzone	0.3053	89.1364
botricchio	0.2530	86.4003	lama	0.2853	83.2476
bottaccio	0.2617	84.1797	lamealucca	0.2775	82.5233
bucoli	0.2755	87.0113	leccio	0.2925	87.6431
castelvecchio	0.2917	86.5262	lischeto	0.2695	82.6628
castruccio	0.2988	89.1069	magno	0.2686	90.1820
ciani	0.2854	82.9946	massa	0.3136	86.4708
collemozzo	0.2965	84.0518	navareccia	0.2945	83.0514
compito	0.2971	87.5712	palaiola	0.3135	83.8382
confine	0.3080	84.1552	pereto	0.3004	83.7337
emissario	0.2936	85.7233	piantoneta	0.2813	86.1952
fontanaccia	0.3029	83.4751	piastraia	0.2771	87.4894
fossabianca	0.2947	86.1632	ponticelli	0.2748	82.5590
fossanera	0.3008	87.0968	pulpitino	0.2610	85.3390
fossanuova	0.3045	91.4023	quinto	0.2941	89.0078
fossanuova tutto	0.3006	89.9321	ralla	0.2953	88.4611
fosso1	0.3214	100.4085	ralletta	0.2981	86.5542
fosso10	0.2977	84.7368	riseccoli	0.3084	83.8710
fosso11	0.2835	82.0928	rogio	0.3278	87.9322
fosso12	0.2790	82.8471	romitorio	0.3009	85.1626
fosso13	0.2885	81.3992	sana	0.3011	89.2763
fosso2	0.3198	84.4072	sangallo	0.2895	84.6855
fosso3	0.3187	83.9105	tanali	0.2824	86.0376
fosso4	0.3181	84.0329	tazzera	0.2863	86.3010
fosso5	0.3163	84.0757	trefontine	0.2603	83.6917
fosso6	0.3088	83.3348	vaiano	0.2564	84.8818
fosso7	0.2843	82.3472	vallealberi	0.2904	84.9660
fosso8	0.2867	83.0419	INTERBACINI	0.301	83.902

Tab. 1 – Parametri a e n delle LSPP dei bacini di acque alte per TR200

Bacini di monte		Bacini di valle	
t	***Kr***	**t**	***Kr***
0.5	0.620521	0.5	0.486203
1	0.673251	1	0.556587
1.5	0.704438	1.5	0.598296
2	0.726506	2	0.627850
2.5	0.7435	2.5	0.650634
3	0.757261	3	0.669099
3.5	0.768781	3.5	0.684570
4	0.778658	4	0.697845
4.5	0.787282	4.5	0.709442
5	0.794917	5	0.719715
5.5	0.801754	5.5	0.728920
6	0.807933	6	0.737244
6.5	0.813562	6.5	0.744829
7	0.818724	7	0.751788
7.5	0.823484	7.5	0.758208
8	0.827895	8	0.764161
9	0.835839	9	0.774886
12	0.854613	12	0.800263
24	0.895596	24	0.855847

Tab. 2 – Coefficienti di ragguaglio areale per lo scenario B

Bacini di monte		Bacini di valle	
t	***Kr***	**t**	***Kr***
0.5	0.573534	0.5	0.503875
1	0.632148	1	0.573453
1.5	0.666866	1.5	0.614556
2	0.691459	2	0.643614
2.5	0.710413	2.5	0.665977
3	0.725771	3	0.684074
3.5	0.738637	3.5	0.699216
4	0.749674	4	0.712194
4.5	0.759315	4.5	0.723519
5	0.767854	5	0.733543
5.5	0.775504	5.5	0.742515
6	0.782421	6	0.750622
6.5	0.788724	6.5	0.758005
7	0.794505	7	0.764773
7.5	0.799839	7.5	0.771012
8	0.804784	8	0.776793
9	0.813691	9	0.787200
12	0.834763	12	0.811774
24	0.88088	24	0.865300

Tab. 3 – Coefficienti di ragguaglio areale per lo scenario C

Bacini	Superficie (kmq)	Pendenza (%)	CN (III)	Bacini	Superficie (kmq)	Pendenza (%)	CN (III)
arpino	8.38	0.04	92.36	fosso9	0.38	0.08	92.26
bientina	3.19	0.17	83.29	fossonero	2.11	0.07	92.27
borreghino	0.53	0.18	87.60	frizzone	4.20	0.05	93.15
botricchio	5.04	0.20	86.84	lama	17.52	0.08	92.17
bottaccio	2.02	0.34	80.15	lamealucca	18.01	0.10	88.69
bucoli	7.82	0.41	79.26	leccio	13.37	0.22	89.66
castelvecchio	7.96	0.35	84.74	lischeto	11.99	0.13	87.33
castruccio	2.73	0.08	89.71	magno	11.00	0.39	79.97
ciani	0.29	0.34	80.79	massa	11.41	0.22	83.24
collemozzo	10.05	0.45	79.12	navareccia	1.98	0.07	92.29
compito	0.98	0.28	85.10	palaiola	2.27	0.14	86.27
confine	0.25	0.36	81.20	pereto	0.49	0.28	83.91
emissario	1.59	0.07	92.95	piantoneta	0.54	0.42	78.04
fontanaccia	0.89	0.07	94.51	piastraia	1.03	0.39	81.29
fossabianca	17.69	0.17	89.36	ponticelli	1.90	0.13	86.45
fossanera	0.37	0.16	83.12	pulpitino	2.81	0.05	93.20
fossanuova	0.23	0.09	92.45	quinto	8.17	0.14	91.85
fossanuova tutto	1.00	0.15	86.30	ralla	1.90	0.08	94.13
fosso1	0.33	0.08	90.52	ralletta	0.75	0.14	88.59
fosso10	0.16	0.19	86.10	riseccoli	13.02	0.09	90.40
fosso11	0.81	0.13	86.49	rogio	6.02	0.40	79.85
fosso12	0.25	0.15	86.74	romitorio	7.30	0.39	84.08
fosso13	0.57	0.11	87.66	sana	3.55	0.18	90.23
fosso2	0.23	0.03	90.72	sangallo	1.45	0.34	78.83
fosso3	0.64	0.07	90.98	tanali	2.76	0.14	92.61
fosso4	4.29	0.10	88.08	tazzera	11.15	0.21	85.03
fosso5	1.52	0.07	88.87	trefontine	4.56	0.19	88.63
fosso6	8.38	0.04	92.36	vaiano	2.01	0.39	78.29
fosso7	3.19	0.17	83.29	vallealberi	0.38	0.08	92.26
fosso8	0.53	0.18	87.60				

Tab. 4 – Superficie, pendenza media e *CN* dei bacini collinari (o di acque alte)

Interbacini	Superficie (kmq)	Pendenza (%)	CN (III)
INT_asta31	1.38	0.05	92
INT_asta34	0.04	0.10	92
INT_asta4	0.81	0.08	92
INT_asta9	3.82	0.06	92
INT_botricchio	0.43	0.17	92
INT_bottaccio	0.44	0.10	92
INT_bucoli	0.79	0.30	92
INT_confine4	0.85	0.07	92
INT_confine5a	0.59	0.06	92
INT_confine5b	1.74	0.12	92
INT_confine6	0.15	0.06	92
INT_consorziale	2.94	0.07	92
INT_fossabianca	2.13	0.06	92
INT_fossanera	3.21	0.05	92
INT_fossonero	0.11	0.09	92
INT_lecciovalle	2.39	0.06	92
INT_navareccia1	0.83	0.07	92
INT_navareccia2	0.19	0.12	92
INT_palaiola	0.68	0.05	92
INT_ponticelli	6.20	0.08	92
INT_ralletta1	2.10	0.06	92
INT_ralletta2	0.23	0.11	92
INT_riseccoli	1.36	0.07	92
INT_trefontine	0.08	0.09	92
INT_pollini	8.08	0.07	92
INT_oasi	2.37	0.06	92
INT-idrovora	1.58	0.14	92

Tab. 5 – Superficie, pendenza media e *CN* degli interbacini del Padule (o di acque basse)

bacini	Tc SCS	Tc Pezzoli	Tc Puglisi	Tc Ferro	Tc Giandotti	Tc Kirpich	Tc MEDIO
arpino	4.01	7.53	7.17	1.95	12.42	3.98	6.18
borreghino	1.47	0.89	2.17	1.21	2.23	0.52	1.42
botricchio	0.51	0.35	1.83	0.49	1.13	0.28	0.76
bottaccio	1.36	1.53	3.12	1.52	2.87	0.95	1.89
bucoli	1.12	0.51	1.69	0.96	0.93	0.38	0.93
castelvecchio	1.76	1.09	2.23	1.89	1.39	0.67	1.51
castruccio	2.01	1.76	2.80	1.90	1.87	0.95	1.88
ciani	1.63	1.88	3.87	1.12	3.37	1.12	2.17
collemozzo	0.58	0.19	1.06	0.36	0.51	0.18	0.48
compito	1.83	1.39	2.40	2.14	1.60	0.77	1.69
confine	0.94	0.54	1.73	0.67	0.98	0.37	0.87
fontanaccia	0.53	0.20	1.05	0.34	0.52	0.18	0.47
fossabianca	1.37	1.67	3.13	0.85	5.08	0.95	2.18
fossanera	1.15	2.74	3.36	0.64	5.97	2.04	2.65
fossanuova	2.81	2.44	3.15	2.84	4.38	1.19	2.80
fosso1	0.65	0.32	1.45	0.41	0.99	0.23	0.68
fosso10	0.58	0.71	2.63	0.32	2.11	0.72	1.18
fosso11	0.70	0.50	2.10	0.67	1.75	0.43	1.02
fosso12	0.71	0.46	1.77	0.39	1.59	0.42	0.89
fosso13	0.36	0.17	1.34	0.27	0.84	0.19	0.53
fosso2	0.64	0.39	1.64	0.61	1.57	0.29	0.86
fosso3	0.55	0.60	1.30	0.34	1.27	0.23	0.72
fosso4	0.83	0.44	1.44	0.51	1.65	0.35	0.87
fosso5	1.13	1.09	2.34	0.33	2.10	0.56	1.26
fosso6	1.20	0.23	0.88	0.54	1.46	0.50	0.80
fosso7	1.63	2.19	3.86	1.40	3.76	1.20	2.34
fosso8	1.49	1.41	3.34	0.83	2.95	0.93	1.83
fosso9	0.72	0.36	1.64	0.41	1.73	0.45	0.89
fossonero	1.78	1.98	3.79	0.98	3.39	1.06	2.17
frizzone	3.11	6.62	6.28	1.38	8.88	3.47	4.96
lama	2.49	2.98	3.94	2.83	6.95	1.36	3.42
lamealucca	2.58	4.13	5.04	2.86	6.77	1.89	3.88
leccio	2.67	3.45	3.83	2.47	4.20	1.53	3.02
lischeto	2.10	2.81	3.86	2.34	4.35	1.60	2.84
magno	1.71	1.16	2.16	2.24	1.58	0.64	1.58
massa	2.16	1.49	2.62	2.28	2.96	0.81	2.05
navareccia	1.70	1.71	3.39	0.95	3.78	1.10	2.11
palaiola	1.16	0.53	1.66	1.02	1.77	0.36	1.08
pereto	0.38	0.11	0.65	0.47	0.81	0.12	0.42
piantoneta	0.50	0.15	0.88	0.50	0.53	0.15	0.45
piastraia	0.76	0.31	1.30	0.68	0.71	0.26	0.67
pulpitino	1.14	0.89	2.66	0.93	2.23	0.61	1.41
quinto	2.61	5.74	5.88	1.13	9.29	2.34	4.50
ralla	2.45	3.97	4.52	1.93	5.17	1.69	3.29
ralletta	1.07	3.46	2.06	0.93	4.70	0.52	2.12
riseccoli	0.91	0.45	1.46	0.58	1.16	0.30	0.81
rogio_monte	3.07	8.00	2.96	2.44	8.28	1.07	4.30
romitorio	1.20	0.79	1.84	1.66	1.37	0.45	1.22
sana	2.19	2.07	2.93	1.82	1.76	1.11	1.98
sangallo	1.74	2.41	3.66	1.27	2.75	1.19	2.17
tanali	0.86	0.28	0.97	0.81	0.91	0.27	0.68
tazzera	1.36	1.95	3.44	1.12	3.10	0.95	1.99
trefontine	1.96	3.19	4.44	2.25	3.86	1.48	2.87
vaiano	1.37	2.17	3.63	1.44	2.86	1.06	2.09
vallealberi	0.97	0.40	1.38	0.96	0.90	0.32	0.82

Tab. 6 – Tabella dei tempi di corrivazione (h) di ciascun bacino secondo diverse formulazioni e valori medi (in grigio la colonna prescelta)

4.2.2 Risultati del modello e considerazioni

Con il modello idrologico "Padule", si sono potuti ricavare tutti gli idrogrammi relativi a ciascuno dei n. 93 nodi (*junction* o *sink*) di cui alla tavola **T.2 – Carta di sintesi del modello idrologico "Modello Padule"** allegata.

I nodi di maggior interesse sono quelli relativi alle uscite dei bacini di monte, o bacini di acque alte, ed i 2 nodi principali del Canale Emissario Bientina, ovvero i nodi *Emissario-J_B* ed *Emissario-S_C*, in cui le lettere B e C fanno riferimento agli scenari che dovrebbero massimizzare le portate idrologiche in queste due sezioni.

Infatti, come detto, gli scenari di precipitazione modellati sono proprio lo **scenario B** e lo **scenario C**, di cui alla Fig. 18; il primo tende a massimizzare le portate in corrispondenza della sezione di testa del Canale Emissario Bientina (confluenza tra Canale Rogio e Canale della Navareccia), il secondo tende ad amplificare le portate dell'Emissario presso la sua confluenza con il Fosso di Confine (limite dell'ex Lago).

Si ricorda nuovamente che tali portate sono "puramente" idrologiche.

Di seguito sono mostrati tutti gli idrogrammi duecentennali in uscita presso i 2 nodi *Emissario-J_B* ed *Emissario-S_C*, sia per lo scenario di precipitazione B che per lo scenario di precipitazione C.

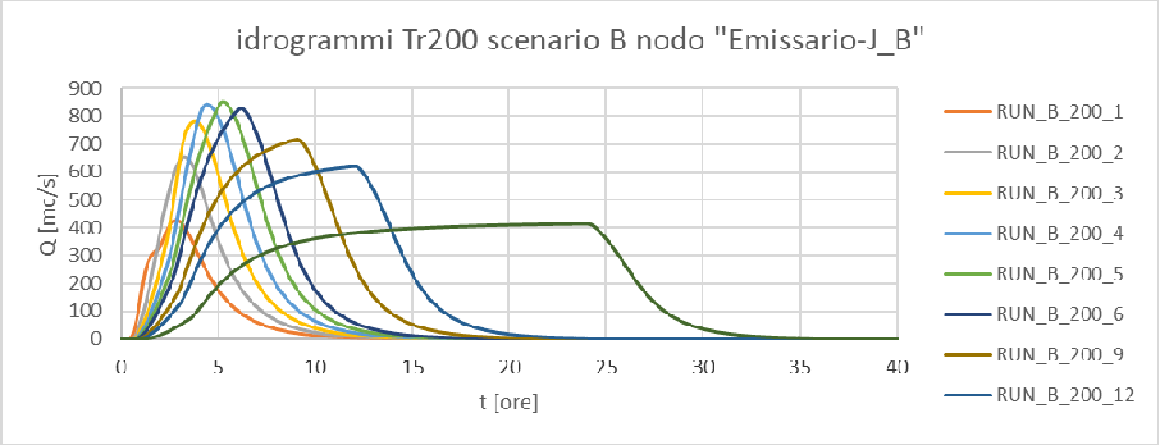


Fig. 26 – Idrogrammi duecentennali nodo *Emissario-J_B* scenario B

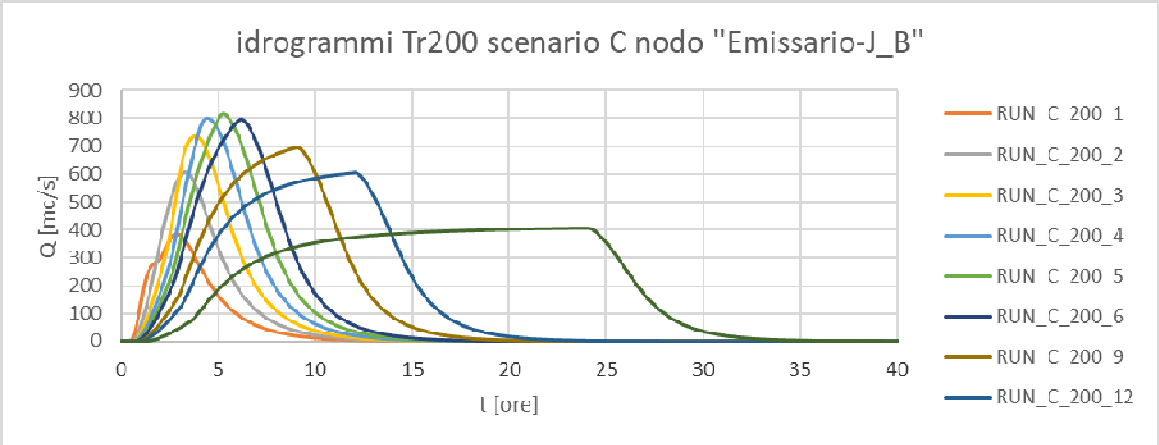


Fig. 27 – Idrogrammi duecentennali nodo *Emissario-J_B* scenario C

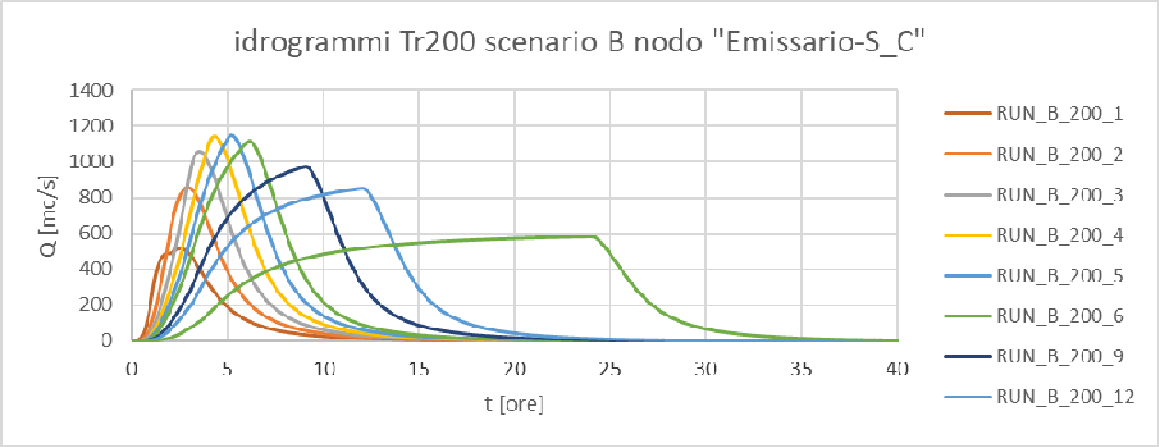


Fig. 28 – Idrogrammi duecentennali nodo *Emissario-S_C* scenario B

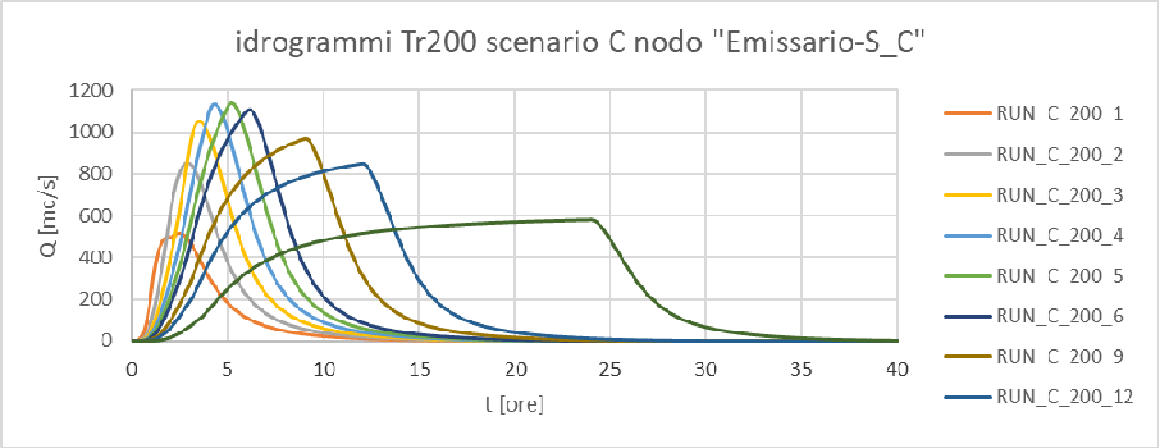


Fig. 29 – Idrogrammi duecentennali nodo *Emissario-S_C* scenario C

Le precedenti figure evidenziano innanzitutto che, sia per il nodo nodi *Emissario-J_B* che per il nodo *Emissario-S_C* **la durata che massimizza gli idrogrammi idrologici del Canale Emissario Bientina è la durata di pioggia pari a 5 ore**.

Come atteso, le portate al nodo *Emissario-J_B* sono leggermente più elevate nello scenario B di precipitazione, in quanto le piogge sui bacini a monte di esso sono state ragguagliate con coefficiente di ragguaglio K_r più elevato, e quelli a valle inferiore.

Invece, per il nodo *Emissario-S_C* la maggiore portata si manifesta nello scenario C di precipitazione.

Comunque le portate di picco sono sostanzialmente non dissimili: per il nodo *Emissario-J_B* il valore di picco duecentennale, nello scenario B, risulta pari a **852 mc/s**, mentre per il nodo *Emissario-S_C* la portata massima duecentennale, nello scenario C, raggiunge i circa **1140 mc/s**, complice soprattutto il pesante contributo del bacino del Rio Ponticelli.

A titolo di confronto si segnala che nello studio idrologico-idraulico del Canale Emissario Bientina per il Regolamento Urbanistico comunale del 2009 la portata massima duecentennale in uscita dal modello (testa del Canale Emissario, alla confluenza tra Canale Rogio e Canale della Navareccia) risultava superiore, ovvero pari a circa 930 mc/s.

Questa differenza, nonostante si siano implementati adesso dati di pioggia aggiornati, è dovuta principalmente a tre fattori:

- Utilizzo di una metodologia diversa di "depurazione" delle piogge; allora, infatti, il passaggio da piogge lorde a piogge nette è stato condotto attraverso il *metodo asintotico di infiltrazione a soglia*, che "depura" in funzione della percentuale di copertura boscata e della velocità di infiltrazione a saturazione K_s.

- Utilizzo di una metodologia diversa per la valutazione del tempo di ritardo: il tempo di ritardo è stato a suo tempo stimato mediante la relazione che lega ai parametri di Nash, n e k, a loro volta correlati ai rapporti Horton e alla gerarchizzazione del reticolo secondo Strahler; attraverso opportune semplificazioni i parametri di Nash, e quindi il tempo di ritardo, sono stati calcolati anche sul reticolo di acque basse.
- Scarsa discretizzazione del modello idrologico di HEC HMS, in cui non sono stati considerati i tempi di trasferimento attraverso tutti i canali del Padule (i cosiddetti *reach* del modello idrologico, adottati invece nel presente lavoro).

Per questi motivi il modello idrologico precedente tendeva ad anticipare il picco dell'idrogramma (infatti la durata critica di pioggia risultava essere pari a 4 ore) e ad amplificare decisamente i volumi prodotti da ciascun bacino.

Si ritiene pertanto assolutamente più affidabile il calcolo idrologico condotto attraverso il questo nuovo modello.

Un'altra importante conferma della validità e della cautela con la quale è stato predisposto il modello giunge dal confronto tra le portate specifiche ottenute con la modellazione e quelle suggerite dal Prof. Castelli nell'ambito dello studio "Assetto idrologico-idraulico e portate di piena per l'Unione Valdera" di cui alla convenzione di ricerca tra Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (UNIFI) e Unione dei Comune della Valdera (2019) redatto a supporto del Piano Strutturale Intercomunale dell'Unione.

In detto lavoro venivano indicate le portate specifiche duecentennali (mc/ s kmq) di riferimento per il territorio dell'Unione, di cui fa parte il Comune di Bientina, valutate con il software MODIBIC.

La successiva figura riassume tali indicazioni.

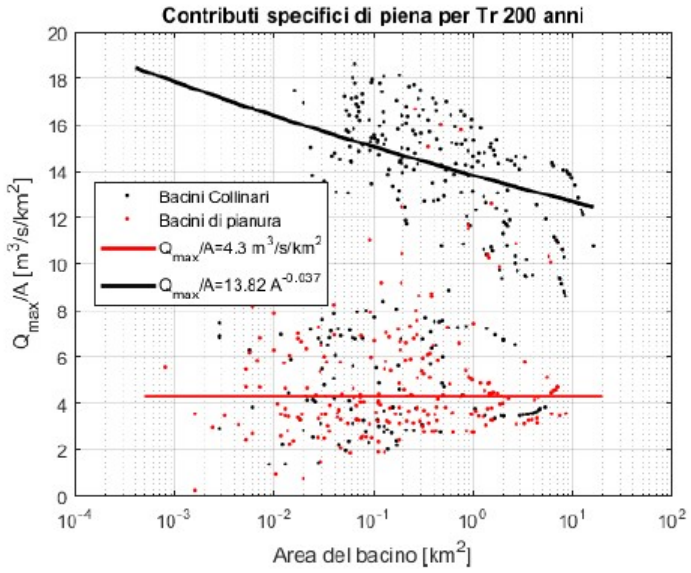


Fig. 30 – Grafico delle portate specifiche (Prof. Castelli)

Per i bacini prevalentemente pianeggianti la portata specifica duecentennale di riferimento, al di sotto della quale si potrebbe incorrere in sottostime, è fissata a 4.3 mc/s kmq.

Per i bacini collinari invece è fornita una relazione empirica in funzione della superficie del bacino.

Confrontando questi riferimenti con i risultati del modello idrologico appena descritto emerge quanto riportato nella successiva tabella. Per facilitare il confronto i bacini sono stati differenziati in "prevalentemente collinari" e "prevalentemente pianeggianti"; il confronto è effettuato rispetto ai soli bacini per così dire "massimizzati" con lo scenario di precipitazione B.

bacini prevalentemente collinari	durata di pioggia critica (da modello idrologico scenario B)	A	Q200	Q200/A	Q200/A curva Prof. Castelli	bacini prevalentemente pianeggianti	durata di pioggia critica (da modello idrologico scenario B)	A	Q200	Q200/A
	(h)	(kmq)	(mc/s)	(mc/s kmq)	(mc/s kmq)		(h)	(kmq)	(mc/s)	(mc/s kmq)
borreghino	2	3.19	20.63	6.47	*3.06*	arpino	4	8.38	45.9	5.48
ciani	2	2.73	19.42	7.11	*2.63*	fossabianca	1	1.59	14.25	8.96
compito	3	10.05	53.95	5.37	*9.23*	fossanera	1	0.89	9.35	10.51
confine	1	0.98	7.6	7.76	*0.98*	fosso5	1	0.23	2.01	8.74
fossanuova	3	17.69	264.54	14.95	*15.91*	fosso9	1	0.38	4.34	11.42
fosso1	1	0.37	4.09	11.05	*0.38*	fosso10	1	0.23	2.89	12.57
fosso2	1	0.81	7.97	9.84	*0.82*	frizzone	3	4.2	26.63	6.34
fosso3	1	0.25	2.58	10.32	*0.26*	navareccia	2	1.98	15.11	7.63
fosso4	1	0.57	5.21	9.14	*0.58*	ralletta	1	1.9	20.33	10.70
fosso8	2	1.52	10.96	7.21	*1.50*	rogiomonte	3	13.02	78.65	6.04
fossonero	2	2.11	15.88	7.53	*2.05*					
lama	2	17.52	108.49	6.19	*15.76*	Q200/A media Prof. Castelli				*4.3*
leccio	3	13.37	80.74	6.04	*12.15*					
massa	3	11.41	64.69	5.67	*10.43*					
palaiola	2	2.27	17.16	7.56	*2.20*					
riseccoli	1	0.75	6.77	9.03	*0.76*					
sangallo	2	3.55	25.85	7.28	*3.39*					
tazzera	1	2.76	24.1	8.73	*2.66*					

Tab. 7 – Confronto tra portate specifiche di picco del modello idrologico e portate specifiche Prof. Castelli

La precedente tabella mostra che, per i bacini di pianura, le portate specifiche ottenute sono sempre superiori a quella di riferimento di 4.3 mc/s kmq.

Per i bacini di collina risultano inferiori a quella di riferimento soltanto le portate dei bacini più estesi. Ciò avviene perché nel modello si è supposta una precipitazione omogenea su tutto il bacino posto a monte della confluenza tra Canale Rogio e Canale della Navareccia (scenario B), pertanto le portate ottenute non corrispondono con le portate effettivamente massime, in quanto vi è stato applicato un coefficiente di ragguaglio su un areale più esteso.

Se applicassimo il "vero" coefficiente di ragguaglio per ciascuno di questi bacini (più prossimo al valore di 1), otterremmo portate specifiche assai maggiori rispetto a quelle indicate dalla formulazione empirica di riferimento.

Possiamo quindi affermare che anche sotto questo punto di vista i valori di portata stimati con l'idrologia del "Modello Padule" sono da ritenersi più che affidabili e cautelativi.

Come anticipato, la funzione di questo modello idrologico è duplice:

1. Individuare preliminarmente, grazie all'estensione della modellazione anche agli interbacini di acque basse interni al Padule, la durata di precipitazione capace di massimizzare l'idrogramma idrologico in ingresso al Canale Emissario Bientina (durata critica).
2. Fornire gli idrogrammi idrologici per tutti i bacini di acque alte per quella data durata critica da introdurre nel successivo modello idraulico.

Per quanto concerne il punto 1, si rileva che la durata critica per l'idrogramma idrologico in ingresso al Canale Emissario, nodo *Emissario-J_B*, risulta essere pari a 5 ore, con portata di picco solo leggermente superiore a quella riscontrata per le durate di pioggia di 4 e 6 ore.

Per le durate più lunghe (24, 36, 48 ore) si osservano idrogrammi con picco assai inferiore a quelli con durate di pioggia prossimi a quella critica; ad esempio, il picco dell'idrogramma duecentennale per precipitazioni di 24 ore arriva a circa 414 mc/s, oltre la metà di quello per la durata di 5 ore (852 mc/s).

A livello puramente idrologico le durate di precipitazione più lunghe non determinano idrogrammi importanti in quanto al picco. Questo va in contrasto con la dinamica reale, che vede spesso l'Emissario, e il Padule, in crisi per piogge anche non particolarmente intense ma di notevole durata.

A ciò contribuisce enormemente il funzionamento della "Botte", che, limitando la portata in efflusso, determina rigurgiti tali da rallentare lo "svuotamento" del Padule, uniformando, in termini di livelli e di portate reali, gli effetti di eventi meteorici intensi di durate più vicini alla critica ed eventi meteorici meno intensi ma assai più lunghi.

Alla luce di queste considerazioni si è scelto di implementare nel modello idraulico di cui al successivo Cap. 5 tutti **gli idrogrammi duecentennali relativi allo scenario C con durata di pioggia pari a 6 ore**.

Pur non rappresentando lo scenario che massimizza la portata al nodo *Emissario-J_B*, si è ritenuto appropriato implementare questo scenario per i seguenti motivi:

- Il relativo picco idrologico del Canale Emissario si discosta assai poco da quello critico;
- Lo scenario C valuta in modo omogeneo le risposte di tutti i bacini fino alla confluenza Emissario-Fosso di Confine; in questo modo si è evitato di sottovalutare troppo i contributi dei bacini posti a valle della confluenza Rogio-Navareccia (testa del modello Emissario), come invece fa lo scenario B;
- Le celerità dei vari *reach* introdotte nel modello HEC HMS e valutate secondo la formulazione di cui alla Fig. 24 appaiono eccessive, pertanto si ha ragione di credere che una durata critica più realistica possa essere quella di 6 ore piuttosto che quella di 5 ore;
- L'idrogramma di 6 ore garantisce volumi complessivamente superiori, e ciò influisce maggiormente rispetto all'entità del picco;
- Non sono stati presi in considerazione idrogrammi duecentennali per durate superiori in quanto le portate dei vari bacini, che presi singolarmente hanno superfici non superiori a 18 kmq, si sarebbero eccessivamente ridotte;
- L'estrema complessità della modellazione idraulica di cui al Cap. 5 non consente la simulazione di eventi di durata elevata, richiedendo essa molti giorni di elaborazione.

Pertanto si è proceduto con la predisposizione del modello idraulico assegnandovi quali input idrologici duecentennali quelli relativi ai n. 57 bacini di monte (o bacini di acque alte), lasciando al modello bidimensionale, previa introduzione del solo input meteorico diffuso, la simulazione delle dinamiche di trasferimento all'interno del Padule, ovvero la superficie interessata dai n. 27 interbacini di acque basse del modello HEC HMS.

Di ciò è dato conto nel successivo capitolo.

5. IDRAULICA: IL "MODELLO PADULE"

5.1 Modello del Padule e del Canale Emissario Bientina: approccio metodologico

Il presente lavoro si basa su un approccio metodologico ormai di ampia diffusione.

La particolarità di questo modello, più che nella metodologia, benché le potenzialità dello strumento software utilizzato siano state spinte al massimo della loro capacità, sta nel fatto che esso assolve non soltanto alla funzione tipicamente idraulica, ovvero di simulazione del trasferimento dell'onda di piena attraverso corsi d'acqua e di propagazione delle acque esondate sui territori contermini (con definizione di aree allagate, battenti e velocità), ma anche, e soprattutto, la funzione di sostituirsi a parte del modello idrologico di cui sopra per garantire una stima più attendibile degli effetti di laminazione del Padule e quindi produrre un idrogramma in testa al Canale Emissario Bientina più "realistico".

Tale idrogramma, come detto, sarà poi utilizzato previa rielaborazione di seguito illustrata, in un modello idraulico a parte, per la determinazione dei livelli in alveo del Canale Emissario Bientina, funzionali allo studio idraulico del reticolo minore di valle ("Modello Bientina", capitoli successivi).

E' stata eseguita una modellazione bidimensionale con base topografica a maglia quadrata piuttosto discreta (3m x 3m, discretizzazioni maggiori non sono possibili su un territorio così vasto per ovvie questioni computazionali) che consente di valutare nel dettaglio la propagazione e l'accumulo dei volumi di esondazione sul piano campagna e tutti gli scambi con le numerose aste fluviali studiate.

Si anticipa che, pur avendo modellato lo scenario relativo al tempo di ritorno di 200 anni e la durata di precipitazione di 6 ore, i tempi della simulazione numerica "finale" sono risultati pari a circa 8 giorni.

Nei paragrafi che seguono sono approfondite le tematiche legate al moto bidimensionale affrontate nell'ottica della struttura operativa del codice di calcolo Mike di DHI (versione Mike Hydro 2016), utilizzato per la modellazione (licenza MZ 28831).

Tale codice di calcolo comprende i software Mike Hydro River, Mike 21 e Mike Flood (quest'ultimo rappresentato dall'accoppiamento dei primi due).

Il software Mike Hydro River consente la modellazione monodimensionale dell'alveo, il software Mike 21 la modellazione completamente bidimensionale dell'alveo e delle aree circostanti, mentre il software Mike Flood permette di accoppiare con collegamenti bidirezionali le due simulazioni.

In questo lavoro è stata implementata, come detto, una modellistica accoppiata tramite Mike Flood, monodimensionale all'interno degli alvei delle aste studiate e bidimensionale nel territorio circostante, determinando le aree allagate in termini di battenti e velocità di propagazione.

Si specifica come il software adottato risulti particolarmente appropriato laddove sia necessario riprodurre un reticolo idraulico molto articolato, come nel presente caso. Esso, a differenza di altri codici di calcolo, garantisce ottima stabilità computazionale anche in condizioni "difficili", e risulta particolarmente efficace nel rappresentare i tratti tombati, in quanto consente di introdurre sezioni chiuse, anche di luce e forma variabile, nella rappresentazione delle aste, alternandole con sezioni aperte, e di creare confluenze tra tratti tombati anche di luce e forma diversi; questa peculiarità ha agevolato soprattutto la predisposizione del successivo "Modello Bientina", in cui sono presenti alcune di queste particolari geometrie.

5.1.1 Modellistica monodimensionale Mike Hydro River

MIKE Hydro River è un software capace di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali.

Sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete di De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche, condizioni di calcolo) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire la rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente Gis).

Rispetto ad altri codici di calcolo in circolazione l'apprestamento del modello geometrico con Mike risulta un po' meno intuitivo (ad esempio nella schematizzazione e visualizzazione degli attraversamenti), ma la robustezza del solutore e la molteplicità di condizioni geometriche rappresentabili ne rappresentano un punto di forza.

MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico HD è l'anima del codice di calcolo Mike Hydro River, ed è in grado di riprodurre il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei su qualsiasi tipo di reticolo.

Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

1. portate laterali;
2. condizioni di corrente veloce o lenta;
3. flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
4. differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
5. resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
6. casse d'espansione;
7. condizioni di flusso quasi - bidimensionale sulle pianure alluvionali;
8. azione del vento;
9. nodi idraulici (biforcazioni e confluenze).

Mike Hydro River consente la soluzione delle equazioni idrodinamiche di moto vario con uno schema di soluzione numerica efficiente, consentendo una adeguata rappresentazione delle dinamiche idrauliche durante il passaggio dell'onda di piena.

CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di scegliere tra tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

1. Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito.
   Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.
2. Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico mediante il quale si possono valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle e quindi simulare i fenomeni di rigurgito.
3. Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc. Questo approccio consente la più accurata descrizione del moto.

Ciascun delle tre formulazioni consente di simulare sia reti idrauliche ramificate che reti idrauliche con maglie chiuse, con sezioni sia aperte che chiuse.

EQUAZIONI DI DE SAINT VENANT

Mike Hydro River risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate assumendo che:

- il fluido (acqua) sia incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- la pendenza del fondo sia modesta;
- le lunghezze d'onda siano grandi se paragonate all'altezza dell'acqua, così da considerare la direzione della corrente parallela al fondo, in ogni punto, ipotizzando trascurabile la componente verticale dell'accelerazione, ed assumendo su ogni sezione trasversale alla corrente una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(\alpha\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x}+gA\frac{\partial h}{\partial x}=0$$

Introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali le suddette diventano:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(\alpha\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x}+gA\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{gQQ}{C^2AR}=0$$

dove:
A = area della sezione bagnata (m^2);
C = coefficiente di attrito di Chezy ($m^{1/2}\ s^{-1}$);
g = accelerazione di gravita ($m\ s^{-2}$);
h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);
Q = portata (m^3/s);
R = raggio idraulico (m);
α= coefficiente di distribuzione della quantità di moto;
q = portata laterale addotta ($m^2\ s^{-1}$).

SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene utilizzata un'equazione del moto "ridotta", che trascura il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+gA\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{gQQ}{C^2AR}=0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapida è la variazione della velocità della corrente.

Il vantaggio principale di questa schematizzazione è rappresentato dalla stabilità della soluzione che si è in grado di ottenere, con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

L'approssimazione dell' "onda diffusiva" consiste nel trascurare, nelle equazioni generali di De Saint Venant, tutti i termini legati alla quantità di moto:

$$gA\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{gQQ}{C^2AR}=0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine $\partial h/\partial x$.

Per ragioni di stabilità questo termine viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile.

Sono diversi i tipi di strutture che possono essere simulate:

Stramazzo a larga soglia

Il software determina automaticamente le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

Relazione Q-h

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi dello stramazzo a larga soglia.

Tombino

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso: il codice calcola in automatico una relazione Q-h che contempla tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è calcolata mediante la formula dello stramazzo in parete grossa quando l'imbocco è libero, e mediante la formula della luce a battente quando l'imbocco è sommerso.

Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Strutture mobili

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce a battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

Ponti

In Mike Hydro River possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito.

In particolare sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method).

Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

Dal punto di vista geometrico le luci libere dei ponti sono implementate come *culvert*, mentre l'estradosso è rappresentato da un *weir*.

RESISTENZA D'ATTRITO

Mike Hydro River consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{C^2 AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{M^2 AR^{4/3}}$$

dove M è il coefficiente di Strickler, pari a $1/n$, essendo n il coefficiente di Manning.

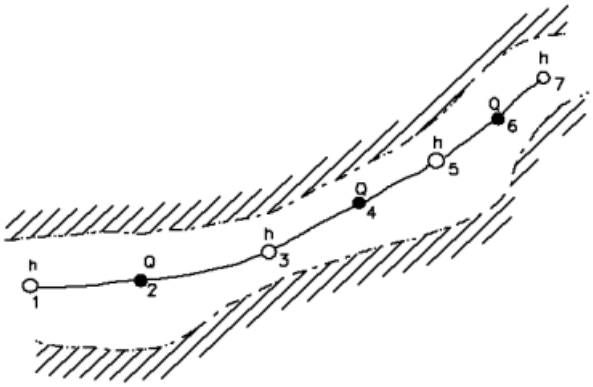
CONDIZIONI INIZIALI

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico.

In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

METODO DI SOLUZIONE

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (si tratta del cosiddetto schema di Abbott a 6 punti).



La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

CONDIZIONI AL CONTORNO

In Mike Hydro River le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne.

Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne.

Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

5.1.2 Modellistica bidimensionale Mike 21

Il Mike 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei.

Il numero "21" che contraddistingue il codice indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore.

MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico (HD) del codice Mike 21 simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili.

In particolare, il modulo HD di Mike 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De Saint Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario.

Il sistema delle equazioni di De Saint Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial q}{\partial y}=0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \xi}{\partial x}+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{yy}\right)\right]-\Omega q-fVV_x+$$

$$+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial p_a}{\partial x}+\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right)=0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \xi}{\partial y}+\frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{yy}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xy}\right)\right]-\Omega p-fVV_y+$$

$$+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial p_a}{\partial y}+\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial x}\right)=0$$

nelle quali:
$h(x,y,t)$ = profondità dell'acqua;
$\xi(x,y,t)$ = quota del pelo libero;
$p,q(x,y,t)$ = portate unitarie nelle direzioni x e y;
$C(x,y)$ = coefficiente di scabrezza di Chezy;
g = accelerazione di gravità;
$f(V)$ = fattore d'attrito del vento;
$V,Vx,Vy(x,y,t)$ = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;
$\Omega(x,y)$ = parametro di Coriolis;
$p_a\ (x,y,t)$ = pressione atmosferica;
ρ_w = densità dell'acqua;
x,y = coordinate spaziali;
t = tempo;
τ_{xx}, τ_{xy}, τ_{yy} = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;
S_{xx},S_{xy},S_{yy} = componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y.

La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale (nella direzione x):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(E\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(E\frac{\partial p}{\partial y}\right)$$

2. dipendente dalla velocità locale (nella direzione x):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hE\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hE\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

Le due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E=c_s^2\Delta^s\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s è una costante compresa tra 0.25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hE\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{2}hE\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right)$$

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ($m^3/s/m$) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m^3/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato.

Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilita numerica.

Al termine del "soft start" la situazione ottenuta è di effettiva stazionarietà.

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni planoaltimetriche della batimetria.

Le equazioni della conservazione della massa e della quantità di moto sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit).

Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).

Il modello Mike 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).

I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato.

Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice.

Ad esempio, per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

5.1.3 Modellistica monodimensionale-bidimensionale accoppiata Mike Flood

Come già anticipato, Mike Flood permette l'accoppiamento tra modello monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree circostanti.

L'accoppiamento dei modelli di Mike Hydro River e Mike 21 è dinamico, ovvero i modelli compiono simultaneamente le loro elaborazioni, ad ogni istante di simulazione avviene uno scambio di dati, e la loro interazione è mutua e bidirezionale.

L'integrazione tra i diversi modelli avviene in modo totalmente dinamico, garantendo quindi la conservazione di massa e quantità di moto tra i diversi sistemi ed è impostata attraverso un'interfaccia grafica comune.

L'accoppiamento tra mono e bidimensionale può avvenire in maniera puntuale, oppure l'accoppiamento può avvenire in maniera distribuita.

Le aste fluviali modellate con Mike Hydro River sono collegate al modello di Mike 21 attraverso tradizionali connessioni laterali (*lateral link*) o connessioni "frontali" (*standard link*).

Per connessioni "frontali" si intendono i casi in cui, ad esempio, un corso d'acqua si immette in un'area di invaso o, più semplicemente, i casi in cui si desidera dare continuità di deflusso, a valle di un'asta modellata con Mike Hydro River, verso un'asta rappresentata solo nella base topografica 2D.

Nel presente modello è stato fatto ampio ricorso alla funzionalità degli *standard link*.

5.2 Geometria del modello idraulico

In questo paragrafo è illustrata la ricostruzione geometrica del modello idraulico "Modello Padule", che ha riguardato per la verità non solo l'area del Padule ma anche tutta l'asta del Canale Emissario Bientina fino alla "Botte", ed alcuni dei suoi principali affluenti di valle.

La geometria del modello idraulico è rappresentata nella tavola **T.3 – Carta di sintesi del modello idraulico "Modello Padule"** allegata.

Di seguito sono forniti maggiori dettagli circa le caratteristiche degli elementi geometrici costituenti il modello ed i criteri in base ai quali essi sono stati definiti o scelti.

5.2.1 Le sezioni idrauliche

Nel modello geometrico è stata riprodotta la quasi totalità del reticolo idrografico di pianura a partire dalle sezioni di chiusura dei bacini collinari, o di acque alte, di cui al modello idrologico, così come individuate nella tavola **T.2 – Carta di sintesi del modello idrologico "Modello Padule"** allegata.

In aggiunta, sono state introdotte ulteriori aste minori di completamento, così da fornire una fotografia quanto più attendibile possibile dell'articolazione del complesso reticolo di bonifica, con particolare riferimento a quello ricadente sui cosiddetti interbacini di pianura di cui al modello idrologico suddetto.

Tutte le aste sono state schematizzate nel modello monodimensionale attraverso sezioni ricavate dal rilievo LIDAR, ad eccezione dell'asta del Canale Emissario Bientina di cui erano disponibili n. 20 sezioni idrauliche rilevate (le medesime adottate nello studio idraulico del 2009).

Complessivamente le aste modellate sono n. 71, per una lunghezza complessiva di circa 90 km, ed un totale di n. 660 sezioni idrauliche.

Ciascuna di queste sezioni, a parte quelle dell'Emissario, sono state estratte dal rilievo LIDAR nella sua versione originale, a maglia 1x1 m.

Le dimensioni abbastanza importanti di molti canali di bonifica hanno consentito di rappresentare dette sezioni in modo piuttosto fedele.

La probabile presenza di acqua nei canali o nei fossi principali all'epoca del rilievo LIDAR (2008) ha comportato verosimilmente la non completa riproduzione del fondo alveo di alcuni di essi. Ai fini della modellazione questa approssimazione è da ritenersi comunque accettabile in quanto va di fatto a sostituirsi alla condizione iniziale di livello idrico già presente in alveo all'istante zero della simulazione.

Per estrare le sezioni è stato fatto un attento lavoro di scelta delle stesse attraverso l'utilizzo di un'elevata discretizzazione cromatica della base LIDAR e privilegiando le sezioni che presentassero forma, dimensioni e pendenza progressiva adeguate.

Nonostante nel reticolo di bonifica vi possano essere numerosi tratti a pendenza quasi nulla o anche in contropendenza, si è scelto di garantire alle aste modellate almeno una pendenza minima verso valle, per agevole il deflusso.

Inoltre, per garantire il deflusso verso valle, sono stati esclusi dalla ricostruzione del modello monodimensionale tutti i manufatti di attraversamento; del resto, lungo reti di bonifica di questo tipo le velocità della corrente sono talmente basse da azzerare, o quasi, le perdite localizzate in corrispondenza dei restringimenti di ponti o altri attraversamenti.

Nel modello sono state invece introdotte le sezioni "portellate", come quelle di confluenza tra Canale Emissario ed alcuni suoi affluenti destri o sinistri a valle della confluenza Rogio-Navareccia.

Per quanto riguarda la scabrezza, a tutte le aste fluviali è stato assegnato il valore n di Manning pari a 0.04 $m^{1/3}/s$, sicuramente cautelativo in relazione al buono stato di manutenzione della vegetazione lungo i principali corsi d'acqua in esame.

Di seguito sono mostrati alcuni confronti tra sezioni idrauliche del Canale Emissario Bientina e omologhe sezioni da LIDAR.

Al di là delle imprecisioni sul fondo alveo (maggiori per il Canale Emissario, sempre "pieno", ma inferiori per gli altri corsi d'acqua), questo confronto mette in evidenza una buona aderenza tra le sezioni. E' quindi ipotizzabile che, quantomeno per i corsi d'acqua di maggiori dimensioni ovvero quelli più importanti ai fini del trasferimento dell'onda di piena verso valle, la riproduzione delle sezioni mediante LIDAR possa essere considerata del tutto accettabile, tenuto anche conto del fatto che buona parte dei canali di bonifica presentano argini o sponde regolarmente oggetto di manutenzione e quindi con scarsa vegetazione.

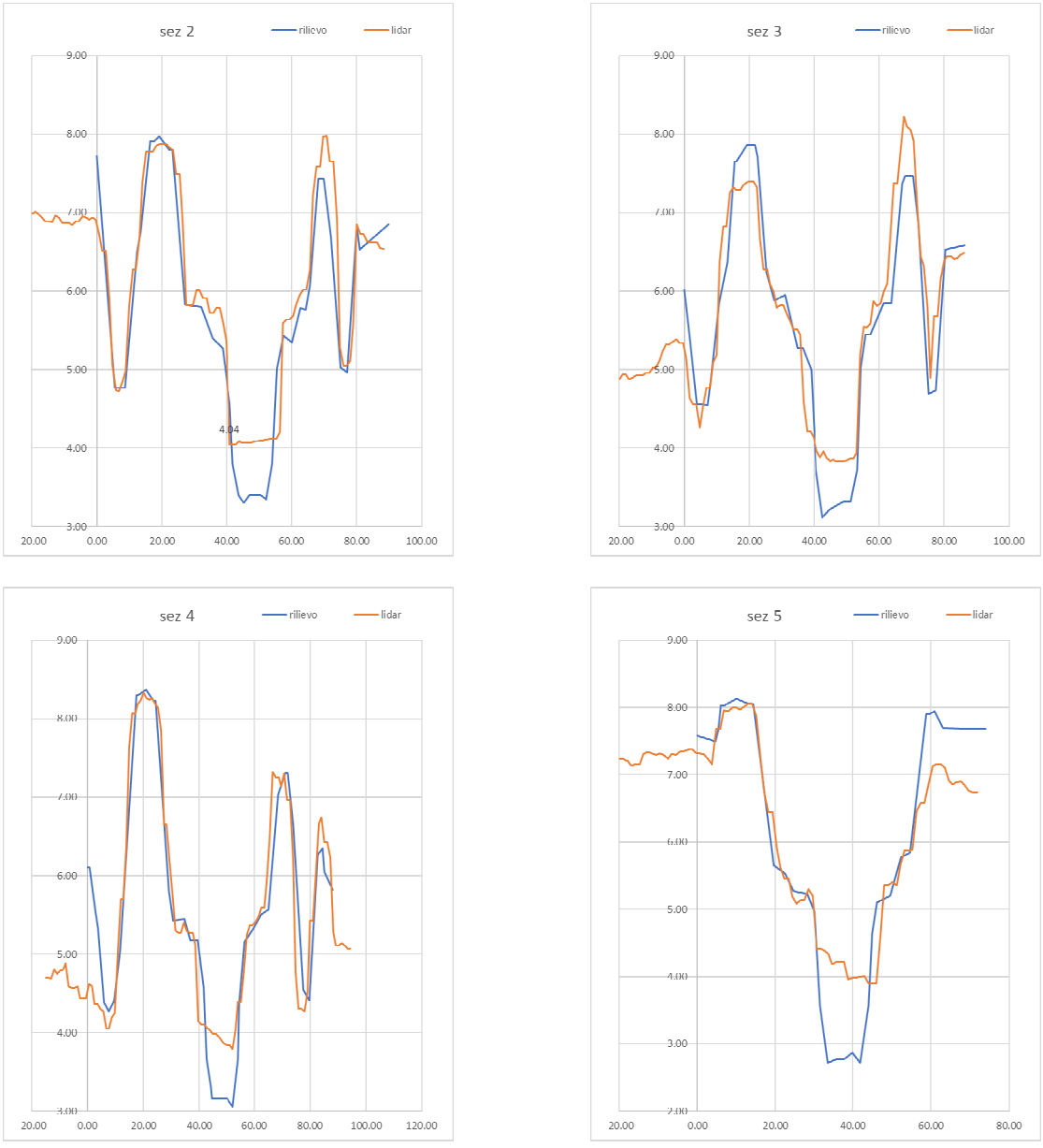


Fig. 31 – Confronto tra la geometria di alcune sezioni del Canale Emissario secondo rilievo e secondo LIDAR

Con riferimento alla precedente figura, si anticipa che come collegamenti idraulici tra aste monodimensionali e base bidimensianale sono stati assunti i profili delle sommità arginali, o delle teste di sponda, così come risultanti dall'interpolazione delle quote delle sezioni del modello monodimensionale; ad esempio, nel caso della Fig. 31, è stato scelto il profilo di sommità arginale definito dalle sezioni in azzurro.

Di seguito è mostrato un estratto, per quanto non molto leggibile, della geometria del modello monodimensionale predisposto con il software Mike Hydro.

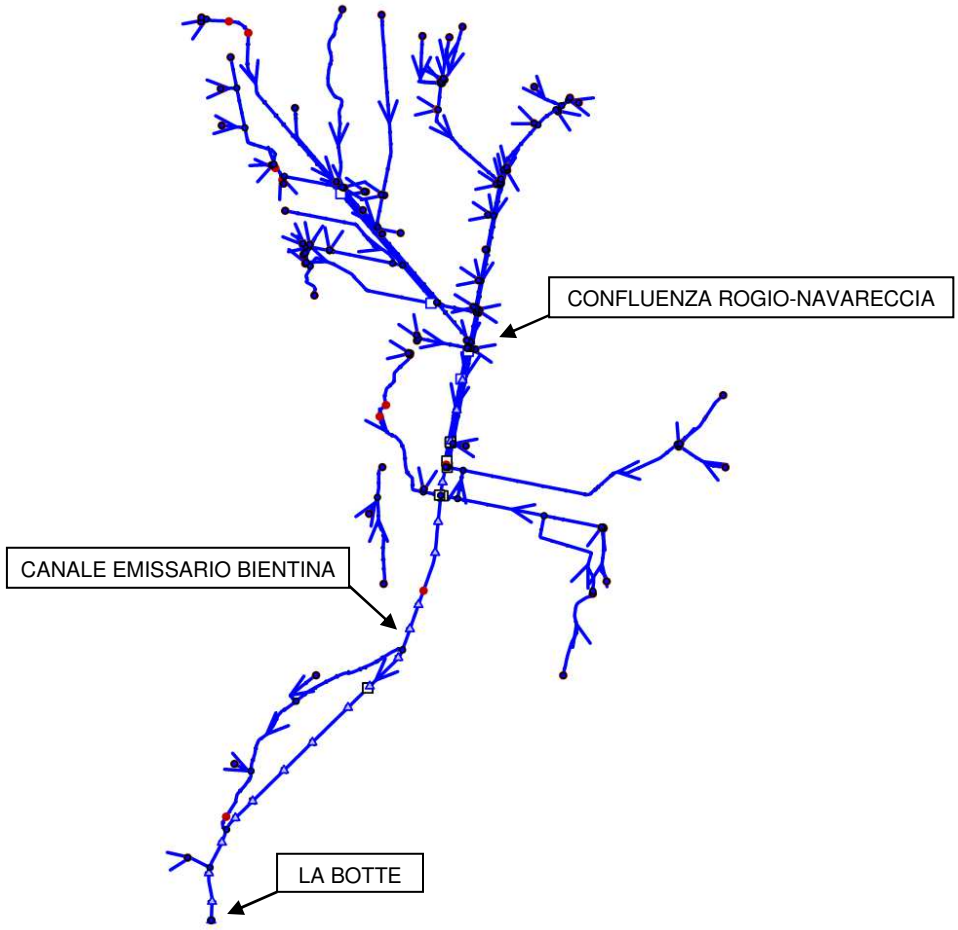


Fig. 32 – Schema del modello idraulico monodimensionale Mike Hydro

Il medesimo schema, come detto, è rappresentato in modo più facilmente leggibile nella tavola **T.3 – Carta di sintesi del modello idraulico "Modello Padule"** allegata.

Segue elencazione di tutte le aste facenti parte del modello idraulico monodimensionale.

corso d'acqua	lunghezza (mt)	corso d'acqua	lunghezza (mt)	corso d'acqua	lunghezza (mt)
emissario	10942.19	asta9	71.26	lama	173.34
asta13	475.54	borreghino	194.66	leccio	3937.69
asta16	57.45	botricchio	1580.84	lecciovalle	1070.62
asta17	56.62	bottaccio	903.03	magno	672.25
asta18	43.97	bucoli	1978.11	massa	102.82
asta19	46.7	castelvecchio	30.82	navareccia	4528.3
asta2	64.87	compito	3142.19	palaiola	1611.26
asta23	162.73	confine	139.82	pereto	407.14
asta24	40.54	confine4	2722.21	piastraia	305.33
asta25	27.92	confine5a	888.86	polliniOUT	44.8
asta28	39.07	confine5b	3103.67	ponticelli	5242.25
asta29	12.9	confine6	2110.29	ralletta	368.8
asta30	48.77	consorziale	4948.45	ramo1	159.31
asta31	95.62	controfossoDX	2025.65	riseccoli	2986.7
asta32	36.91	controfossoSX	2595.14	rogio	7279.72
asta33	39.19	fossabianca	58.32	sangallo	1015.93
asta34	54.29	fossacinque	66.72	serezza	4550.03
asta4	63.36	fossadue	216.82	tanali	310.61
asta41	11.77	fossanera	2614.3	tazzera	1087.75
asta42	27.68	fossanuova	6274.98	trefontine	900.86
asta43	33.72	fosso1	263.58	vaiano	1960.08
asta44	25.12	fosso10	739.62		
asta5	131.16	fosso2	381.72		
asta6	48.19	fosso3	37.7		
asta8	1111.14	fossonero	563.49		

Tab. 8 – Elenco aste modellate (indicate come *asta n* quelle prive di toponimo)

5.2.2 La base bidimensionale

La base bidimensionale del modello è costituita dal rilievo LIDAR, che copre interamente l'area in esame.

Il *raster* originario è stato ricampionato ad una maglia di 3 x 3 m; come anticipato, una base 2D a maglia più discreta non avrebbe garantito tempi computazionali e pesantezza dei risultati ammissibili.

Dal momento che si ipotizzava, come noto, che buona parte del territorio risultasse allagato, e che, inoltre, su questa base bidimensionale è stato introdotto un input meteorico diffuso ed alcuni idrogrammi puntuali, si è reso necessario attuare una serie di correzioni alla base originaria al fine di eliminare tutti gli attraversamenti e le interruzioni delle aste nell'area di studio.

Questa operazione è risultata assai onerosa, e ha comportato la modifica manuale di oltre 1000 celle della base bidimensionale; alcune di queste correzioni sono state eseguite sulla base 1 x 1, prima del ricampionamento a 3 x 3, altre successivamente.

Fig. 33 – Distribuzione delle correzioni manuali applicate alla base bidimensionale del modello

La resistenza del terreno nella base bidimensionale è stata valutata secondo i coefficienti di scabrezza forniti dalla seguente tabella (Pestana e al., 2014), a partire dai dati di uso del suolo di cui alla precedente Fig. 20.

Code	Designation	n
111	Continuos urban fabric	0.230
112	Discontinuous urban fabric	0.115
121	Industrial or commercial units	0.230
122	Roads and rail networks and associated land	0.038
124	Airports	0.230
131	Mineral extraction sites	0.104
132	Dump sites	0.115
133	Construction sites	0.115
142	Sport and leisure facilities	0.023
211	Non-irrigated arable land	0.043
212	Permanently irrigated land	0.043
213	Rice fields	0.023
221	Vineyards	0.043
222	Fruit trees and berry plantations	0.043
223	Olive groves	0.043
231	Pastures	0.298
241	Annual crops associated w/permanent crops	0.043
242	Complex cultivation patterns	0.023
243	Agriculture, w/significant natural vegetation	0.058
244	Agro-forestry areas	0.058
311	Broad-leaved forest	0.230
312	Coniferous forest	0.127
313	Mixed forest	0.230
321	Natural grasslands	0.039
322	Moors and heathland	0.058
323	Sclerophyllous vegetation	0.058
324	Transitional woodland-shrub	0.058
331	Beaches, dunes, sands	0.138
332	Bare rocks	0.104
333	Sparsely vegetated areas	0.104
334	Burnt areas	0.104
411	Inland marshes	0.115
511	Water courses	0.035
512	Water bodies	0.035

Tab. 9 – Resistenza del terreno

I valori di resistenza del terreno di Tab. 9, forniti secondo il parametro n di Manning, sono stati trasformati in parametro k di Gauckler-Strickler ($k=1/n$) come richiesto dal software; la loro distribuzione è mostrata nella successiva figura, proprio nella versione di Gauckler-Strickler.

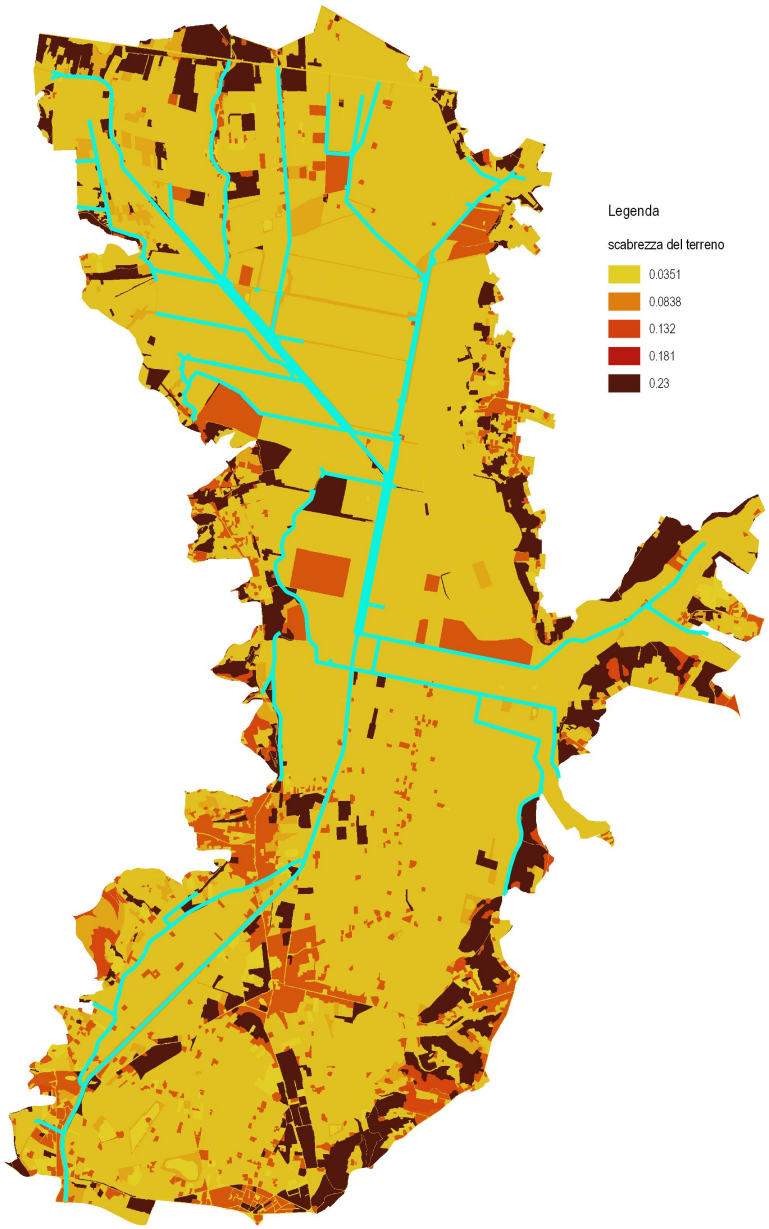


Fig. 34 – Distribuzione del valore di scabrezza K sulla base bidimensionale

5.2.3 I link bidirezionali

Tutte le aste modellate di cui alla tavola **T.3 – Carta di sintesi del modello idraulico "Modello Padule"** allegata sono state collegate alla base bidimensionale attraverso appositi link bidirezionali.

Sono stati predisposti collegamenti laterali (*lateral link*) per tutta la lunghezza di ogni asta, sia in destra che in sinistra.

Per tutte le aste del Padule rappresentate con sezioni da LIDAR al profilo delle connessioni è stata imposta la condizione di quota massima tra punti della sezione e punti della base 2D; dal momento però che le sezioni sono state ricostruite sul LIDAR 1 x 1 e che la base bidimensionale ha maglia 3 x 3, le quote prevalenti risultano quasi ovunque quelle delle sezioni, in quanto il ricampionamento alla maglia 3 x 3 ha necessariamente comportato un leggero appiattimento della superficie del terreno.

Invece, come accennato in precedenza, per l'asta del Canale Emissario Bientina modellato con sezioni provenienti da rilievo, benché un po' datato, alle connessioni laterali è stato assegnato il profilo delle sommità di sponda con quote interpolate tra quelle delle sezioni stesse.

Complessivamente sono state riprodotte connessioni laterali per circa 180 km di lunghezza (circa il doppio della lunghezza complessiva delle aste).

E' stato inoltre fatto ampio ricorso alle connessioni "frontali" con la base bidimensionale per tutte le aste con sezione di valle aperta; per le aste "isolate" e prive di idrogramma in testa il collegamento "frontale" (*standard link*) è stato posto anche in corrispondenza della sezione di monte.

5.3 Condizione di valle: la "Botte"

Nei capitoli precedenti è stato più volte accennato alla rilevanza della condizione di valle presso la "Botte" del modello del Canale Emissario Bientina per una corretta rappresentazione delle dinamiche idrauliche dell'intero Padule.

In questa nuova versione del modello idraulico dell'Emissario si è inteso rivedere la condizione di valle applicata negli studi precedenti, ovvero la **scala di deflusso della "Botte"**.

Per fare ciò sono stati innanzitutto acquisiti dal Genio Civile di Pisa i dati di un rilievo eseguito proprio sul manufatto della "Botte".

Mediante questo rilievo si sono potute constatare le reali dimensioni delle due "canne", che sono risultate leggermente diverse tra loro, e leggermente diverse anche rispetto alle informazioni con cui è stato schematizzato questo manufatto negli studi precedenti.
Tale rilievo non è stato però in grado di chiarire la reale pendenza interna del manufatto, mancando della quota di fondo in corrispondenza della sezione di imbocco.

Grazie a queste nuove informazioni geometriche è stato predisposto un apposito modello idraulico semplificato della "Botte", al fine di valutare, rispetto ad una scala variabile di portate in ingresso, la reale capacità di smaltimento ed i livelli di rigurgito alla sezione di monte.
La modellazione idraulica del semplice *culvert* della "Botte" è stata eseguita in moto permanente con l'ausilio del software HEC RAS.

Da subito si è riscontrata, tra i vari elementi geometrici del modello (ad esempio pendenza interna della "Botte" e le varie parametrizzazioni come scabrezza, coefficienti di contrazione/espansione, *ineffective flow area* etc) la **significatività della pendenza del corso d'acqua a valle** del manufatto.
Non disponendo di sezioni idrauliche del Canale Emissario, se non ad oltre 4.5 km dallo sbocco, sono state eseguite nuove misure di quota per risalire, in via presuntiva, alla pendenza di fondo alveo del Canale Emissario a valle della "Botte".
Per rilevare le quote di fondo alveo di un corso d'acqua come l'Emissario, con livello idrico di 1-1.5 metri sempre presente, sarebbe stata necessaria un'attrezzatura di rilevamento topografico non disponibile. Pertanto si è inteso rilevare il pelo libero dell'acqua in diversi punti a valle della "Botte", ipotizzando una loro correlazione con la pendenza del fondo; questa approssimazione può essere ritenuta accettabile laddove la sezione del corso d'acqua mantiene forma e dimensioni costanti, ed il Canale Emissario, a valle della "Botte", presenta queste caratteristiche.

In un primo momento è stato effettuato un rilievo sui primi 800 metri circa a valle del manufatto: da questo rilievo sono scaturite quote del pelo libero pressoché costanti, tanto da far pensare ad una pendenza del fondo quasi nulla (pendenza pari a circa lo 0.00005 %) lungo il tratto rilevato.
Ritendendo eccessivamente bassa la pendenza, si è proceduto ad un secondo rilievo, attraverso il quale sono state rilevate le quote del pelo libero in alcuni punti lungo un tratto più esteso, fino alla sezione presso "Giovanni Calzature", a Cascina, posta ad una distanza di circa 4.500 m dalla "Botte".
In questo caso le quote del pelo libero hanno evidenziato una maggiore variazione, soprattutto se valutate sull'intero tratto di valle; la pendenza del pelo libero, e quindi la pendenza supposta del fondo alveo, è risultata adesso pari a circa lo 0.0002 %, assai prossima a quello dell'ultimo tratto del Canale Emissario a monte della "Botte".

Si è quindi proceduto a costruire il modello idraulico del *culvert* adottando questo valore di pendenza, che, per una verifica in moto permanente, costituisce la condizione di valle del modello.

Di seguito sono mostrate le sezioni di monte e valle della "Botte" secondo la schematizzazione del software HEC RAS.

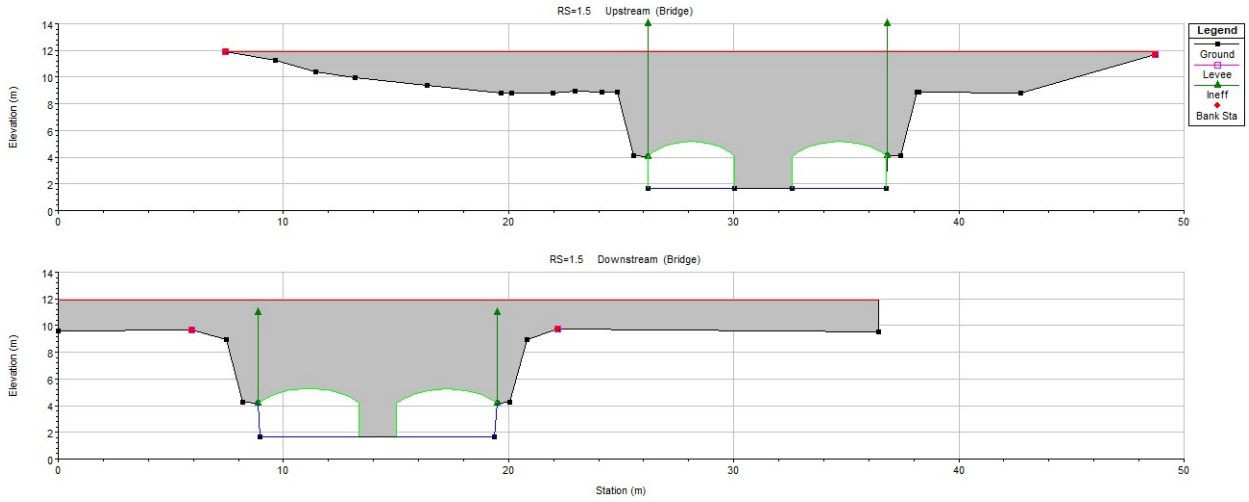


Fig. 35 – Sezioni di monte e valle della "Botte" nel modello idraulico

I risultati di detta modellazione sono di seguito sono mostrati attraverso i profili della corrente a cavallo del manufatto di attraversamento.

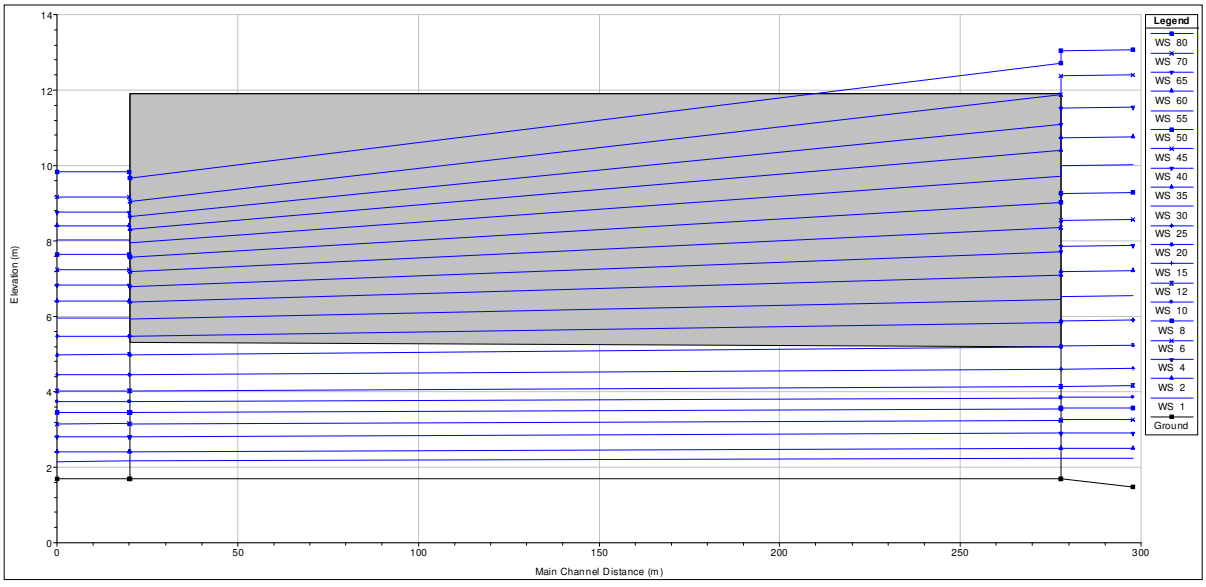
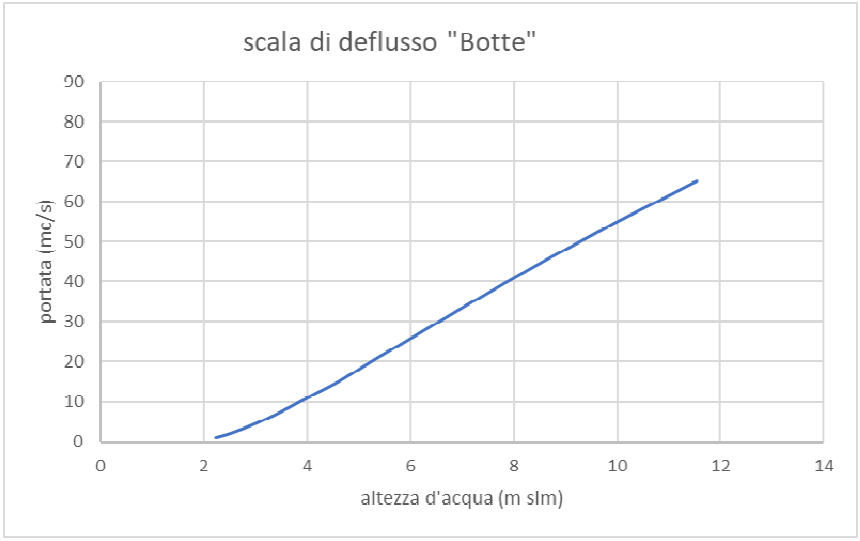


Fig. 36 – Profilo idraulico del modello semplificato della "Botte"

La figura precedente mostra i profili della corrente per le seguenti portate in ingresso: 1 - 2 - 3 – 4 – 6 – 8 – 10 – 12 – 15 – 20 – 25 – 30 – 35 – 40 – 45 – 50 – 55 – 60 – 65 – 70 – 80 mc/s.

Il modello evidenzia la possibile entrata in pressione delle due "canne" per portate intorno a 20 mc/s.

Per portate di 65 mc/s il rigurgito sarebbe tale da superare l'estradosso dell'attraversamento (che in questo è stato posto alla quota di 12 m s.l.m., pari alle sommità arginali laterali, anche se nella realtà risulta più elevato per presenza degli argini del Fiume Arno).



Q (mc/s)	H (m s.l.m.)
1	2.23
2	2.50
4	2.91
6	3.26
8	3.57
10	3.86
12	4.16
15	4.61
20	5.24
25	5.90
30	6.55
35	7.21
40	7.88
45	8.57
50	9.28
55	10.01
60	10.77
65	11.54
70	---
80	---

Fig. 37 – Nuova scala di deflusso della "Botte"

5.4 Input idrologici e condizioni iniziali

Nel modello idraulico "Modello Padule" sono presenti n. 71 differenti aste fluviali.

Molte di esse corrispondono alle aste dei corsi d'acqua che hanno origine dai rispettivi bacini di monte, così come rappresentati nel modello idrologico di cui al capitolo precedente.

Però non a tutti i n. 55 bacini per così dire collinari del modello idrologico corrispondono altrettante aste nel modello idraulico.

In alcuni casi, soprattutto per alcuni corsi d'acqua più piccoli e/o privi di argini e/o drenanti acque basse si è optato rappresentarli esclusivamente nella base bidimensionale.

In questi casi i relativi contributi idrologici (idrogrammi) sono stati inseriti come input puntuali direttamente sulla base bidimensionale.

In altri casi gli idrogrammi sono inseriti come contributi laterali ad altre aste.

La tavola **T.3 – Carta di sintesi del modello idraulico "Modello Padule"** allegata colloca su carta ciascun input idrologico e lo differenzia per tipologia.

Oltre agli idrogrammi della "corona" di bacini esterna al Padule, nel modello idraulico è stato inserito, come ampiamente anticipato, anche il contributo meteorico del bacino interno.

Sull'area individuata anch'essa in tavola **T.3** è stata implementata una precipitazione diffusa netta, preliminarmente ragguagliata e "depurata" secondo i criteri di cui al capitolo precedente.

Nella porzione sud del fondovalle del Canale Emissario (dal Fosso Zero in poi, in sinistra idraulica, e dalla "Tura" in destra idraulica) non è stato considerato alcun input meteorico. Ciò in virtù del fatto che, per le caratteristiche del terreno, il contributo di tutti i fossi di bonifica alla formazione della piena del Canale Emissario è da considerarsi trascurabile per diversi motivi:

- Innanzitutto i fossi in sinistra idraulica fino al Fosso della Grondaccia (escluso) sono dotati di portella, quindi in caso di innalzamento dei livelli nell'Emissario il loro apporto risulta praticamente nullo (questo aspetto è confermato dalle simulazioni del "modello Bientina" di cui ai capitoli successivi).
- Tutti gli altri fossi più a valle, pur privi di regolazione allo scarico, presentano comunque quote di immissione abbastanza basse e quindi anche la loro dinamica, in caso di innalzamento dei livelli nell'Emissario, risulta rigurgitato (anche ciò è confermato dalle simulazioni del "modello Bientina").

- Escludendo quindi il contributo dei corsi d'acqua sinistri e destri fino all'altezza della Fossa Nuova (corso d'acqua più a valle tra quelli modellati nel "modello Bientina") la porzione di bacino restante, ricadente su Calcinaia e Vicopisano, risulta assai modesta in termini di superficie affinché il proprio contributo alla piena dell'Emissario possa ritenersi significativo. Inoltre con tutte le assunzioni a favore di sicurezza di cui in seguito (modello "solo" Emissario) sono individuati livelli nel Canale ben più elevati di quelli che potenzialmente potrebbero determinare i contributi di portata di questi affluenti minori residui.

Il software Mike richiede che l'input meteorico sia rappresentato da un file bidimensionale tempo-variabile (**.dsf2*) in cui l'altezza di pioggia (mm) sia trasformata in intensità di pioggia (mm/h).

Per ridurre il numero di intervalli temporali, e quindi la pesantezza, di questo file, le intensità di pioggia sono state mediate su ogni 30 minuti.

Come indicato in calce al Cap. 4, **l'evento di piena simulato è quello duecentennale con durata di pioggia di 6 ore riferito allo scenario C di precipitazione**.

Gli idrogrammi e le piogge introdotti nel modello idraulico sono quindi quelli relativi a detto evento, così come calcolati nel modello idrologico.

Nei vari incontri di coordinamento svoltisi presso gli uffici del Genio Civile di Pisa e dell'Autorità Distrettuale dell'Appennino Settentrionale in cui sono stati mostrati i risultati delle prime modellazioni provvisorie è emersa la necessità di applicare al modello una **condizione iniziale di Padule già allagato**, al fine di rappresentare al meglio gli allagamenti che frequentemente interessano questa porzione di territorio.

Per fare ciò sono state prese a riferimento le condizioni raggiunte durante l'evento di piena del Marzo 2018 che ha provocato significativi allagamenti nel Padule.

Le foto aeree di questo evento sono disponibili nella cronologia di *Google Earth*, come mostra la figura successiva.

Fig. 38 – Immagine degli allagamenti del Padule in occasione dell'evento del Marzo 2018

A partire da queste immagini aeree si è risaliti ai livelli del pelo libero tracciando preliminarmente il confine delle aree allagate e successivamente confrontandoli con le curve di livello del terreno.

Le quote delle curve di livello che meglio approssimavano le superfici bagnate sono state assunte, per ciascun settore del Padule compreso tra argini o rilevati, come livelli idrometrici di partenza, all'istante zero della simulazione.

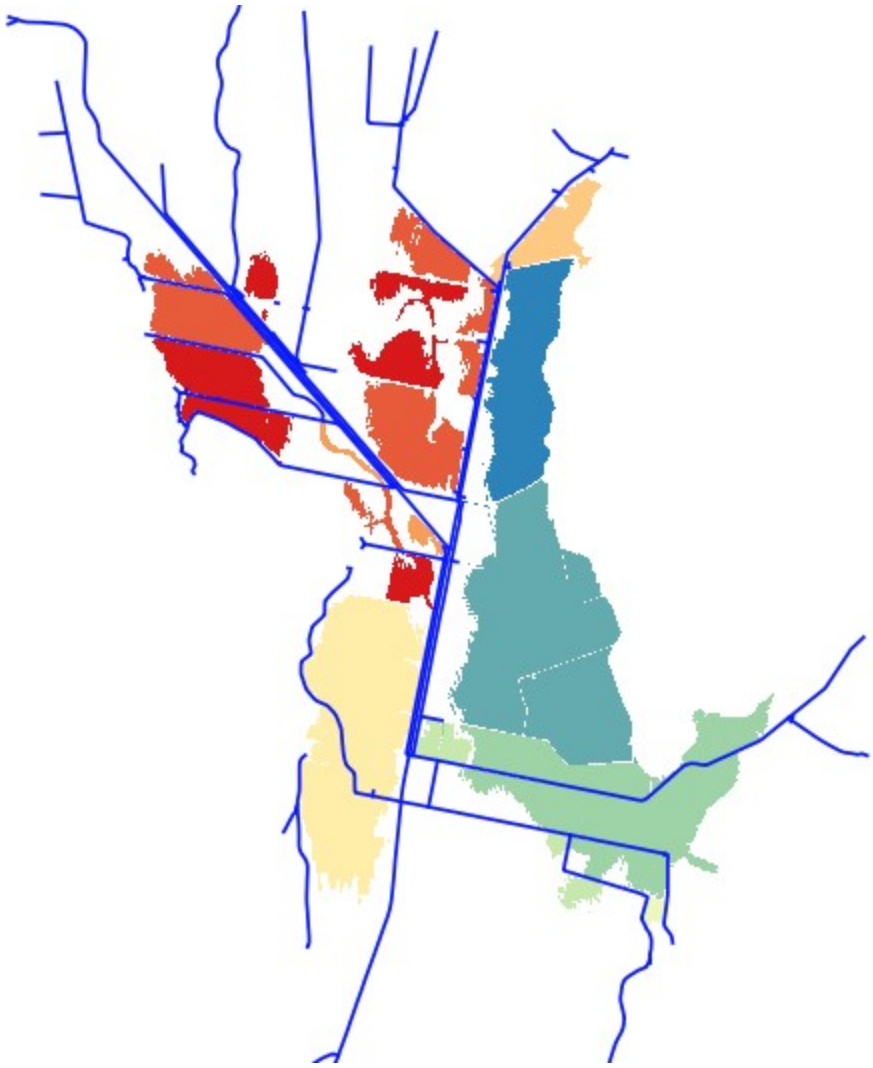


Fig. 39 – Ricostruzione dei livelli di allagamento del Padule (evento Marzo 2018)

Complessivamente a questi livelli idrometrici corrisponde, dal confronto con le quote della base LIDAR, una volumetria di circa 8 milioni di metri cubi.

Si sottolinea che la foto aerea presa a riferimento risale al giorno 22/03/2018, mentre l'evento di piena si è verificato il giorno 19/03/2018, quindi i livelli non coincidono con la fase di picco dell'evento, che altrimenti avrebbe rappresentato una condizione iniziale troppo gravosa.

5.5 Risultati della modellazione

La modellazione idraulica del sistema del Padule e del Canale Emissario Bientina è stata condotta per un duplice scopo:

- Individuare la massima portata in transito alla sezione di monte del Canale Emissario Bientina ed è proprio a tal fine che è stato implementato un evento di piena prossimo a quello idrologicamente critico; tale obiettivo rappresenta quello principale, in quanto costituisce il motivo per cui questo modello idraulico è stato approntato ad integrazione del modello idrologico di cui al Cap. 4.;
- Mappare le aree allagate, e conseguentemente i battenti e le velocità per il settore Nord del territorio comunale, ovvero quello corrispondente all'ex Lago di Bientina.
  In accoglimento delle indicazioni del Genio Civile, questo secondo obiettivo non si è poi tradotto in una revisione della mappatura di pericolosità da alluvione in quanto il modello non ha preso in considerazione tutti i possibili scenari idrologici nella zona del Padule, pertanto le aree allagate ed i battenti risultanti sono stati adottati soltanto ai fini di una "taratura" qualitativa del funzionamento idraulico del sistema e sono state quindi confermate le attuali perimetrazioni del P.G.R.A. (vedi tavole allegate).

L'evento di piena con tempo di ritorno duecentennale e durata di precipitazione pari a 6 ore nello scenario C è stato simulato a partire dall'istante 0:00 all'istante 16:00 ore; la durata computazionale effettiva è risultata pari a circa 8 giorni.

E' evidente come la complessità del modello non consentisse simulazioni più lunghe o elaborazione di scenari con durate di precipitazione maggiori.

Le 16 ore di simulazione hanno però garantito il raggiungimento, ed il superamento, del picco di piena alla sezione di testa del Canale Emissario Bientina (Sez. 1).

Il picco di piena si è manifestato all'istante 13:15, quindi quasi 8 ore dopo la fine dell'evento, ed ha raggiunto i 36.12 mc/s.

Questo dato in un certo senso "stupisce" se confrontato con la portata idrologica stimata dal relativo modello, pari a circa 800 mc/s.

La seguente figura mostra detto idrogramma e ne individua il picco.

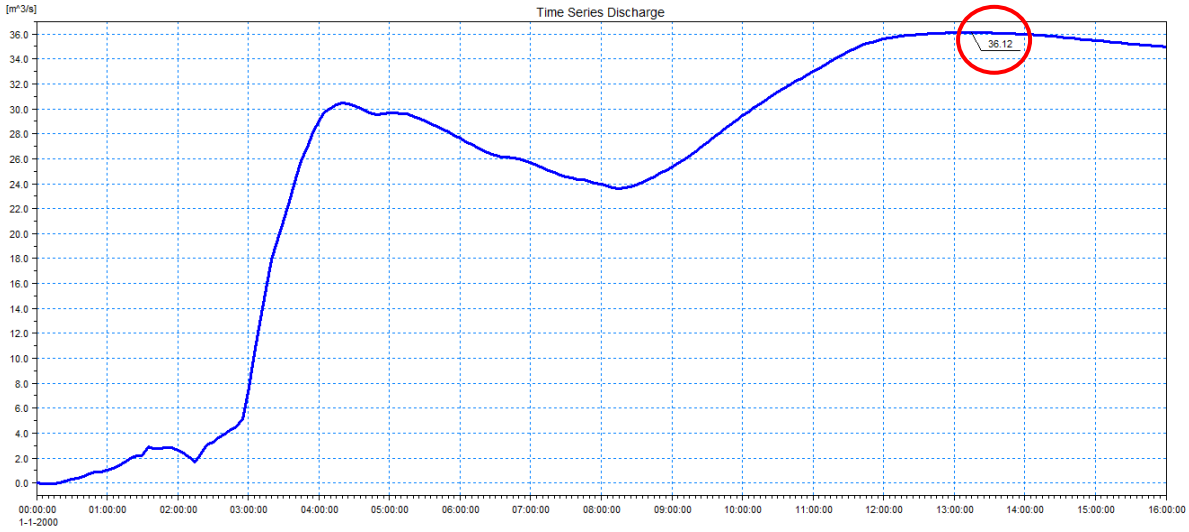


Fig. 40 – Idrogramma di piena alla sezione di monte del Canale Emissario Bientina

I corsi d'acqua afferenti al Padule, capaci di produrre una portata duecentennale idrologica di oltre 800 mc/s, lasciano gran parte dei propri volumi all'interno del Padule stesso, che si allaga abbondantemente. La tracimazione per lunghi tratti dei corsi d'acqua arginati, oltre a quella della quasi totalità dei corsi d'acqua privi di argini, è dovuta principalmente alla scarsa capacità di smaltimento del collettore principale, il Canale Emissario, anche per effetto della "Botte"; ma è dovuta anche alla presenza di cateratte, che impediscono lo smaltimento dei volumi di piena di corsi d'acqua anche significativi, come il Rio Ponticelli.

Il rigurgito che dal Canale Emissario si estende a tutto il reticolo, dapprima ai corsi d'acqua più importanti come il Canale Rogio e il Canale della Navareccia, e da lì a tutto il reticolo minore, in caso di precipitazioni intense rende di fatto il Padule una grande area di espansione naturale, o meglio un lago, cioè quello che già è stato.

Le tavole allegate **T.6** (carte della pericolosità da alluvione) e **T.7** (carte dei battenti) riguardano soltanto il territorio comunale di Bientina.

La seguente figura mostra invece i risultati del modello in termini di battente su tutta l'area di studio.

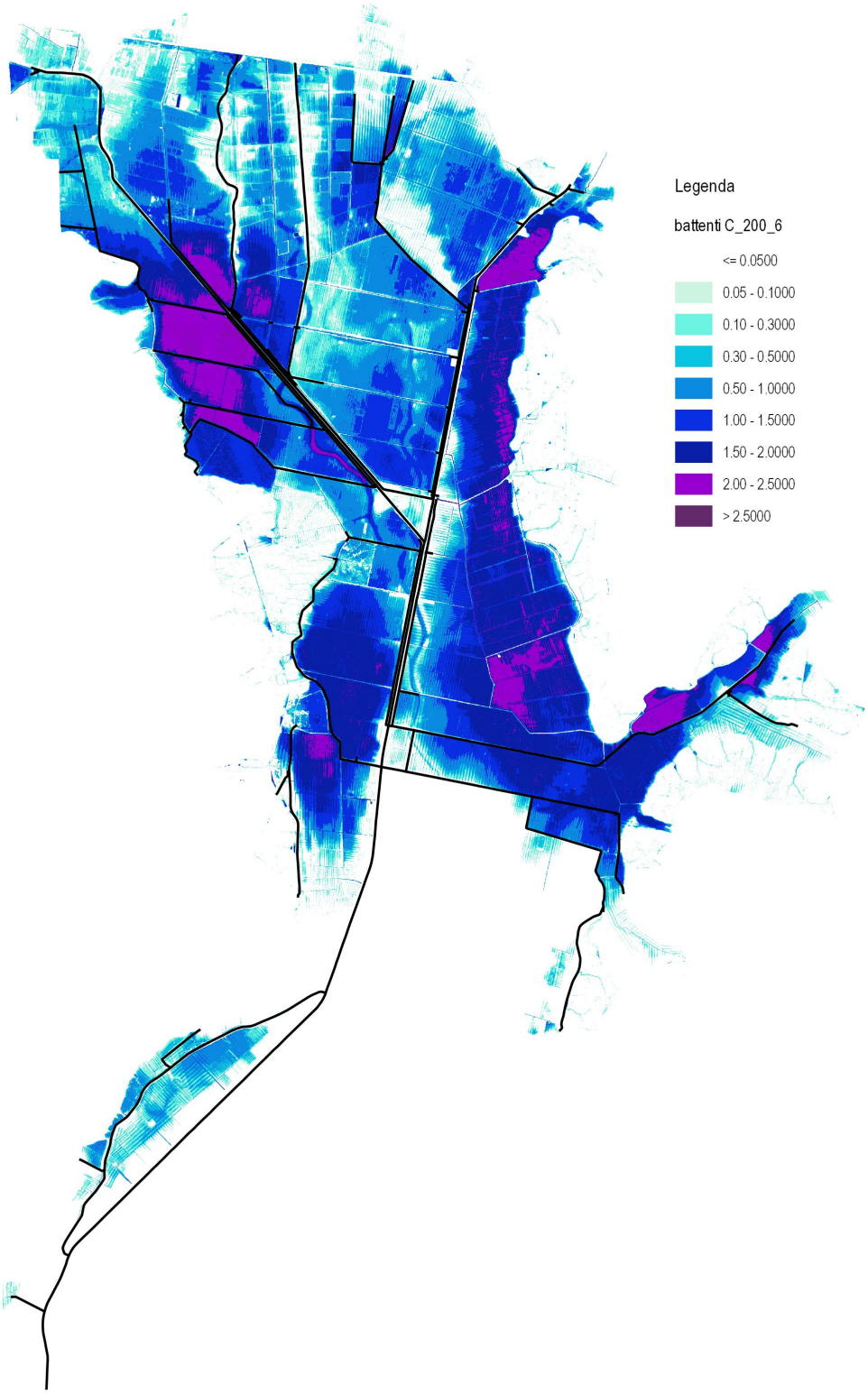


Fig. 41 – Estratto dei battenti "lordi" del modello idraulico

Di questi risultati si possono osservare alcuni aspetti:

- Il modello amplifica le esondazioni nel settore Nord e Nord-Ovest del Padule, in quanto ai vari corsi d'acqua ad esso afferenti sono introdotte portate idrologiche importanti che, ad esempio per i corsi d'acqua provenienti da Nord che sottopassano l'autostrada A11, appaiono sovrastimate in quanto non tengono alcun conto delle fuoriuscite di monte;
- Gli affluenti dell'Emissario posti a valle della confluenza Rogio-Navareccia non contribuiscono in alcun modo alla formazione della piena. Ad esempio il Rio Ponticelli, il maggiore degli affluenti di valle, recapita soltanto 1 mc/s durante le prime fasi dell'evento, e ciò vale per tutti gli altri corsi d'acqua muniti di cateratta. Risulta praticamente nullo anche il contributo degli affluenti di valle non "portellati": il Rio Magno a Cascine di Buti, attraverso il Rio della Serezza, riceve soltanto (rigurgita), e non immette, mentre il Rio del Romitorio, a Vicopisano, recapita al massimo 18 mc/s ma solo durante le prime fasi dell'evento (dopo 10 ore il contributo è nullo). Questa constatazione conferma la validità della scelta di non inserire alcun altro contributo di portata a valle della confluenza tra Canale Emissario e Fosso di Confine (limite dell'ex Lago).
- Facendo riferimento al punto precedente, si rileva che la formazione dell'onda di piena del Canale Emissario Bientina dipende esclusivamente dagli apporti di monte da parte del Canale Rogio e del Canale della Navareccia; tali apporti, peraltro, non risultano neanche sincroni, in quanto i bacini che sottendono i tratti finali di questi corsi d'acqua hanno dimensioni decisamente diverse.

Dal momento che non abbiamo a disposizione alcun elemento di possibile taratura del modello, né di tipo idrologico né di tipo idrometrico (seppur si sia tentato di ricavare questi dati anche attraverso la consultazione degli Annali Idrologici dei primi anni del '900 in cui erano presenti aste graduate alla "Botte" e anche presso altre sezioni del Canale Emissario), si è cercato di effettuare una "**taratura qualitativa**" dei risultati di questo modello.

E' noto che il Canale Emissario Bientina sovente tracimi in sponda destra nel primo tratto, tra le sezioni n. 1 e n. 4 fino al ponte sulla Via del Tiglio.

Il modello idraulico dell'evento di piena con tempo di ritorno 200 anni e durata di 6 ore non riesce a riprodurre detto fenomeno (la mancata riproduzione di questo fenomeno non incide però sull'estensione delle aree allagate né sulla quantificazione dei battenti dal momento che il modello parte da una condizione iniziale di sovrallagamento del Padule).

Si rileva però che la dinamica dei tratti finali due corsi d'acqua che alimentano l'Emissario (Canale Rogio e Canale della Navareccia) sia effettivamente consona con quanto è stato riscontrato in caso di piene, come confermato anche dai tecnici del Consorzio di Bonifica Toscana Nord; infatti questi due corsi d'acqua arrivano all'Emissario quasi a piene rive, tracimando più a monte.

La spiegazione di questa "discrepanza" lungo l'asta del Canale Emissario è probabilmente legata al fatto che l'evento rappresentato, pur massimale in termini di combinazione di portate generate dai vari bacini, non ha una durata abbastanza lunga tale da "mettere maggiormente in crisi" il deflusso attraverso la "Botte", ovvero tale da incrementare ulteriormente il rigurgito e quindi determinare livelli più elevati lungo tutta l'asta, compreso il tratto di monte ove la quota della sponda arginale destra risulta più bassa.

Si ritiene dunque che la questione riguardi soprattutto le volumetrie complessivamente prodotte dall'evento di piena, piuttosto che la "criticità idrologica" dell'evento.

Allo stesso tempo si ritiene corretto considerare la portata raggiunta con il modello idraulico alla sezione di monte (Q=36 mc/s) come possibile portata di picco.

Si ipotizza dunque che tale portata, o comunque una portata similare, possa essere raggiunta anche da eventi di durata maggiore. Tali eventi avrebbero però il "vantaggio" di produrre maggiori volumi inducendo di conseguenza un maggior rigurgito lungo l'asta per effetto della limitata capacità di smaltimento della "Botte".

Per quanto detto, si assume il **valore di 35 mc/s come portata di picco per il Canale Emissario Bientina** nella sezione in testa al modello.

Tale valore è alla base delle modellazioni di "taratura" e calcolo dei livelli idrometrici massimi relative al solo Canale Emissario di cui al paragrafo successivo.

5.6 Modello idraulico per condizioni di valle "modello Bientina"

Il presente lavoro ha come oggetto la determinazione delle nuove pericolosità da alluvione sul territorio comunale di Bientina.

Gli allagamenti del Padule di cui al modello idraulico "Modello Padule" coprono solo una porzione del territorio comunale, ovvero quella di minor interesse in quanto priva di urbanizzazione.

I potenziali allagamenti del territorio urbanizzato sono indagati attraverso il "Modello Bientina", di cui ai capitoli successivi.

Il "Modello Bientina" prende in esame la parte Sud del Comune, e studia tutti gli affluenti sinistri del Canale Emissario posti a valle del Fosso di Confine.

Per le verifiche di questi corsi d'acqua risulta necessario individuare le condizioni di valle di ciascuno di essi, ovvero i livelli idrometrici del Canale Emissario Bientina in corrispondenza della loro confluenza.

Per fare ciò, partendo dalle considerazioni conclusive del Par. 5.5 e dalla determinazione della portata di picco del Canale Emissario, fissata in 35 mc/s, sono state predisposte due distinte modellazioni idrauliche del solo Canale Emissario finalizzate alla stima dei massimi livelli in alveo.

Con questi modelli si è inteso simulare il passaggio di un'onda di piena a portata costante (35 mc/s) per durate di 24 – 36 – 48 ore. L'obiettivo è stato quello di verificare se, in queste condizioni, il modello riuscisse a riprodurre i sormonti arginali noti; e qualora ciò fosse confermato, adottare i livelli in alveo relativi all'evento "tarato" come condizioni di valle del modello idraulico degli affluenti.

Il primo passaggio è stato quello di riprendere il "vecchio" modello quasi-bidimensionale di HEC RAS utilizzato nello studio idraulico del R.U. 2009.

Dopo aver uniformato scabrezze, condizione di valle ("Botte") e altri parametri a quelli adottati nel nuovo modello idraulico del Padule, sono state eseguite le simulazioni per le durate precedentemente citate e portata costante di 35 mc/s.

La seguente figura ne mostra i profili della corrente.

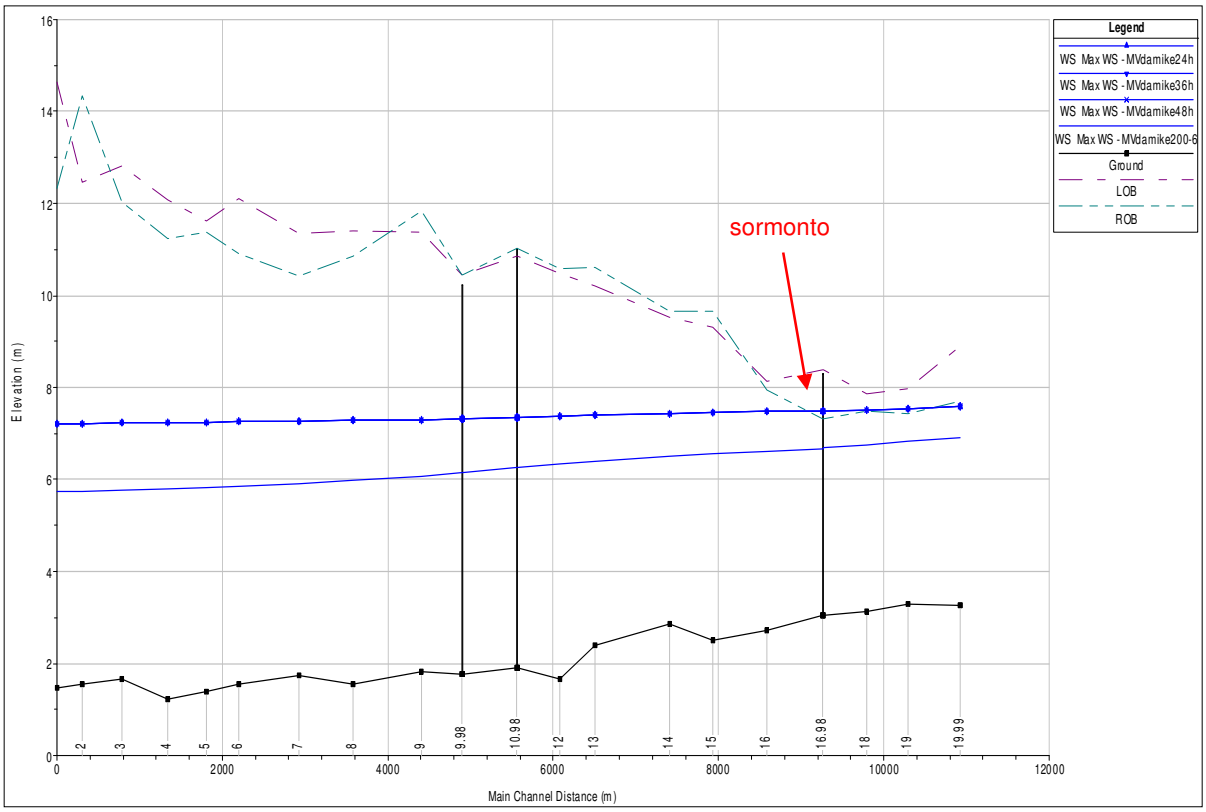


Fig. 42 – Profili della corrente con modello HEC RAS solo Emissario e durate di precipitazione lunghe

Nella precedente figura è riportato anche il profilo relativo all'idrogramma in testa all'Emissario esito del nuovo modello idraulico, cioè quello della precedente Fig. 40.

E' inoltre disegnato l'andamento delle sommità arginali destre (verde) e sinistre (viola).

I profili di Fig. 42 si rivelano identici per tutte le tre durate considerate, e evidenziano il sormonto in sponda destra fino al ponte di Via del Tiglio.

Ciò sta a significare che qualora il sistema Padule fosse in grado di generare una portata costante dell'ordine di 35 mc/s per una durata di almeno 24 ore il livello dell'Emissario si innalzerebbe fino a sormontare la sponda destra nel tratto di monte.

Il raggiungimento di tale livello di sormonto potrebbe essere garantito anche da eventi di minore intensità, ma con durata ancora superiore, come frequentemente accade sul territorio.

Per la scelta dello scenario finale da cui estrarre i livelli idrometrici da porre come condizione di valle di tutti gli affluenti di cui al "Modello Bientina" del capitolo successivo si è voluto procedere con ancora maggiore cautela.

Dopo questa "taratura qualitativa" con il modello monodimensionale HEC RAS, per coerenza con gli altri modelli, è stato costruito un modello monodimensionale del solo Emissario anche col software Mike.

Questa volta, a differenza del modello HEC RAS in cui erano già presenti le *lateral structure* che collegano l'asta alle *storage area* e che quindi consentivano la fuoriuscita dei volumi, con il modello Mike si è esclusa questa possibilità, simulando le medesime durate lunghe con portata costante a 35 mc/s senza però consentire alcuna tracimazione.

Di seguito sono mostrati i profili più significativi.

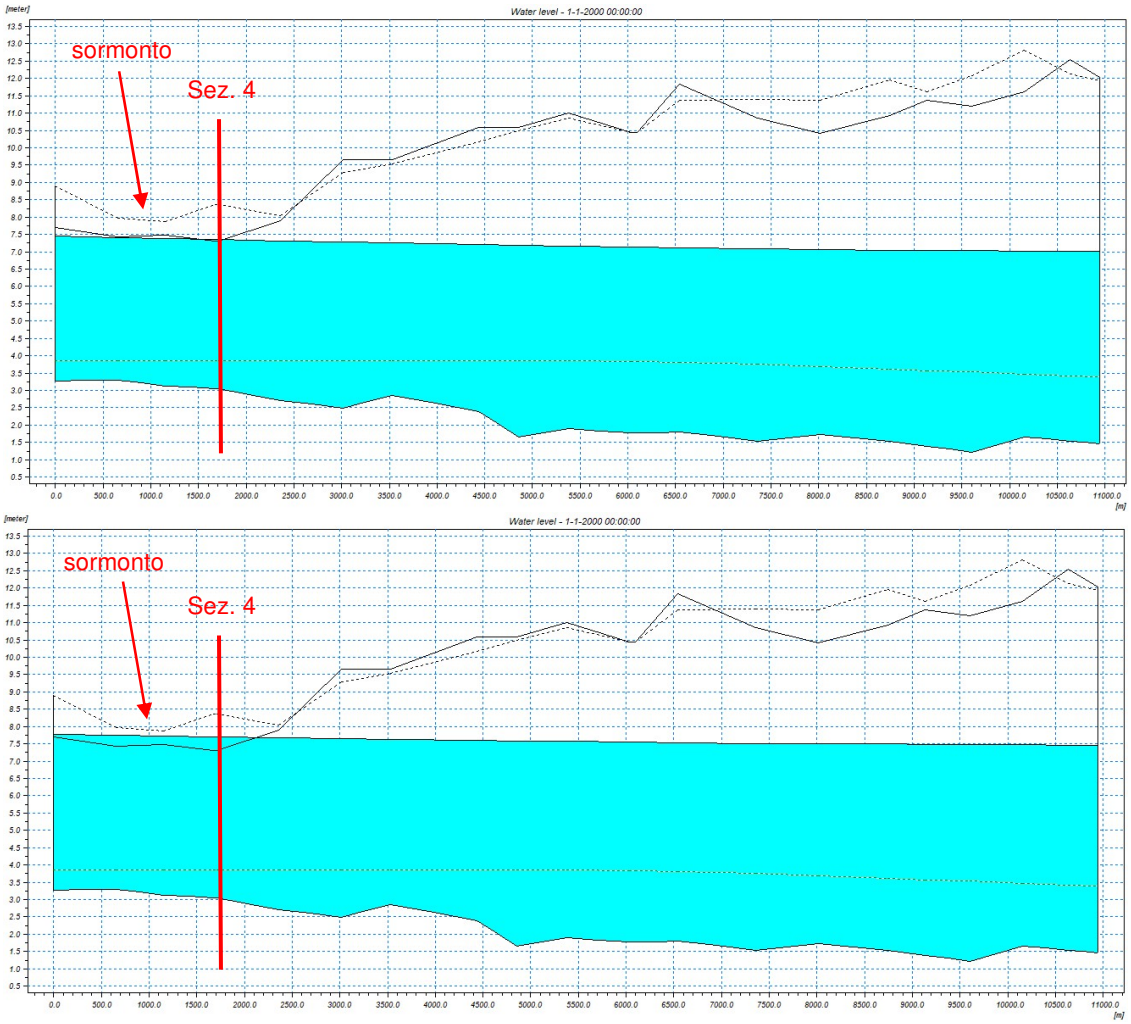


Fig. 43 – Profili della corrente con modello Mike solo Emissario e durate di precipitazione di 24 e 48 ore

Per la durata di precipitazione di 24 ore si inizia a manifestare il sormonto in destra, per la durata di 48 ore il livello si innalza ulteriormente dal momento che non è considerata la fuoriuscita.

Indicativamente, tra i due profili si osserva una differenza di quota di circa 50 cm.

In conclusione, a estremo favore di sicurezza, per la modellazione idraulica degli affluenti di cui al successivo Cap. 7 le condizioni di valle sono ricavate dai risultati della simulazione del solo Canale Emissario nello scenario con portata di piena costante per 48 ore consecutive, al lordo delle mancate fuoriuscite per sormonto arginale.

6. IDROLOGIA: IL "MODELLO BIENTINA"

Il "Modello Bientina", ovvero il modello delle aree urbanizzate o con case sparse posto nella parte Sud del territorio comunale, è stato configurato attraverso una metodologia analoga a quella adottata per il "Modello Padule", sia per quanto riguarda la modellistica idrologica che la modellistica idraulica.

L'area in esame coincide con quasi tutto il territorio comunale a valle del confine dell'ex Lago di Bientina (non ne fa parte solo la piccola porzione di Sud-Est, dove si trovano le frazioni di Quattro Strade e Santa Colomba, non ricadente entro il bacino del Canale Emissario Bientina).

Si tratta di una porzione di pianura piuttosto ampia, che dal Padule si estende verso l'abitato di Bientina, sviluppandosi tra l'asta del Canale Emissario e le Colline delle Cerbaie.

La porzione in oggetto presenta una superficie pari a circa 18 kmq, con oltre 13 kmq di pianura (da Loc. Puntone fino all'estremità Sud del Comune, al confine con Calcinaia), circa 3 kmq di collina e ulteriori 2 kmq di area urbanizzata.

L'analisi idrologica, eseguita anche in questo caso attraverso il software HEC HMS, è stata predisposta in funzione del modello idraulico di cui al successivo Cap. 7.

Come per il modello idraulico del Padule, o del Canale Emissario, è stato approntato un modello idraulico bidimensionale con input idrologico "misto", in parte rappresentato da idrogrammi ed in parte da un contributo meteorico diffuso sulla base 2D.

Su tutta l'area di pianura sono state introdotte precipitazioni diffuse, perciò il modello idrologico è servito esclusivamente a stimare gli idrogrammi dei piccoli bacini collinari e anche dei bacini urbani.

La tavola **T.4 – Carta di sintesi del modello idrologico "Modello Bientina"** riporta detti bacini collinari (n. 7) e urbani (n. 7).

Come detto l'approccio metodologico risulta esattamente lo stesso del "Modello Padule".

Per i bacini collinari sono stati calcolati i valori dei parametri delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (a e n) di ciascun bacino; essi sono mostrati nella seguente tabella; per i bacini urbani a e n fanno riferimento ad un unico macro-bacino.

Bacini	*n*	*a*
bac1	0.270	82.272
bac2	0.291	77.327
bac3	0.288	78.236
bac4	0.292	78.412
bac5	0.292	78.645
bac6	0.284	78.840
bac7	0.282	79.813
u1 – u7	0.287	80.931

Tab. 10 – Parametri a e n delle LSPP dei bacini collinari del "Modello Bientina" per TR200

Anche in questo caso sono stati considerati ietogrammi di pioggia rettangolari, ma non è stato eseguito alcun ragguaglio areale (K_r=1).

La scelta dello ietogramma rettangolare, oltre che per motivi di uniformità con l'idrologia del "modello Padule", è stata compiuta in base alla considerazione, confermata dalle modellazioni, che i corsi d'acqua in esame hanno un comportamento rigurgitato per effetto delle condizioni di valle e della presenza di portelle (solo quelli più a monte); per questo motivo, piuttosto che la distribuzione della portata durante l'evento, assumono rilevanza i volumi complessivamente generati dall'evento, come dimostra il fatto che le condizioni più gravose di allagamento sono per buona parte del territorio definite dagli eventi meteorici più lunghi (24 ore nel caso in esame), tenuto anche conto che la condizione al contorno è unica per ciascun corso d'acqua.

La "depurazione" delle piogge è stata eseguita con il metodo *SCS*, fondato sul valore del *Curve Number*; questo metodo è stato adottato anche per i bacini urbani.

Il parametro *CN* era già stato valutato per il tutto il bacino del Canale Emissario Bientina, perciò in questo caso è stato sufficiente estrarre i valori caratteristici di ciascun bacino.

La seguente tabella riporta superficie, pendenza media e valori di *CN* di ciascun bacino.

Bacini collinari	Superficie (kmq)	Pendenza (%)	CN (III)	Bacini urbani	Superficie (kmq)	Pendenza (%)	CN (III)
bac1	0.52	0.18	89.38	u1	0.45	0.05	96.28
bac2	0.14	0.17	89.88	u2	0.05	0.05	96.54
bac3	0.79	0.20	90.04	u3	0.07	0.04	95.41
bac4	0.40	0.19	88.92	u4	0.65	0.04	96.51
bac5	0.34	0.19	89.43	u5	0.03	0.04	96.37
bac6	0.43	0.18	89.27	u6	0.12	0.03	96.33
bac7	0.43	0.18	89.49	u7	0.33	0.04	96.75

Tab. 11 – Superficie, pendenza media e *CN* dei bacini collinari e dei bacini urbani del "Modello Bientina"

Come in precedenza, la trasformazione afflussi-deflussi, sia per i bacini collinari che per quelli urbani, è stata eseguita mediante il metodo dell'idrogramma unitario SCS.

Per il calcolo del tempo di corrivazione stavolta non sono stati posti a confronto i risultati ottenuti attraverso varie formulazioni, ma si è adottato direttamente la relazione proposta dal metodo SCS, come nel "Modello Padule".

Tale formula **(14)** richiede la stima della lunghezza del massimo percorso all'interno di ciascun bacino. Trattandosi di bacini urbani, serviti da sistema fognario misto, i massimi percorsi sono stati ricavati in base all'effettivo sviluppo della rete fognaria fino al recapito nel reticolo superficiale (vedi Fig. 14).

Bacini collinari	Tempo di corrivazione (h)	Bacini urbani	Tempo di corrivazione (h)
bac1	0.38	u1	0.70
bac2	0.21	u2	0.17
bac3	0.46	u3	0.38
bac4	0.40	u4	0.74
bac5	0.47	u5	0.12
bac6	0.46	u6	0.50
bac7	0.34	u7	0.36

Tab. 12 – Tabella dei tempi di corrivazione (h) di ciascun bacino collinare e urbano

Di seguito è mostrato lo schema planimetrico del modello idrologico con HEC HMS, che ha una struttura molto semplice in quanto ad ogni *subbasin* corrisponde un *sink* in uscita.

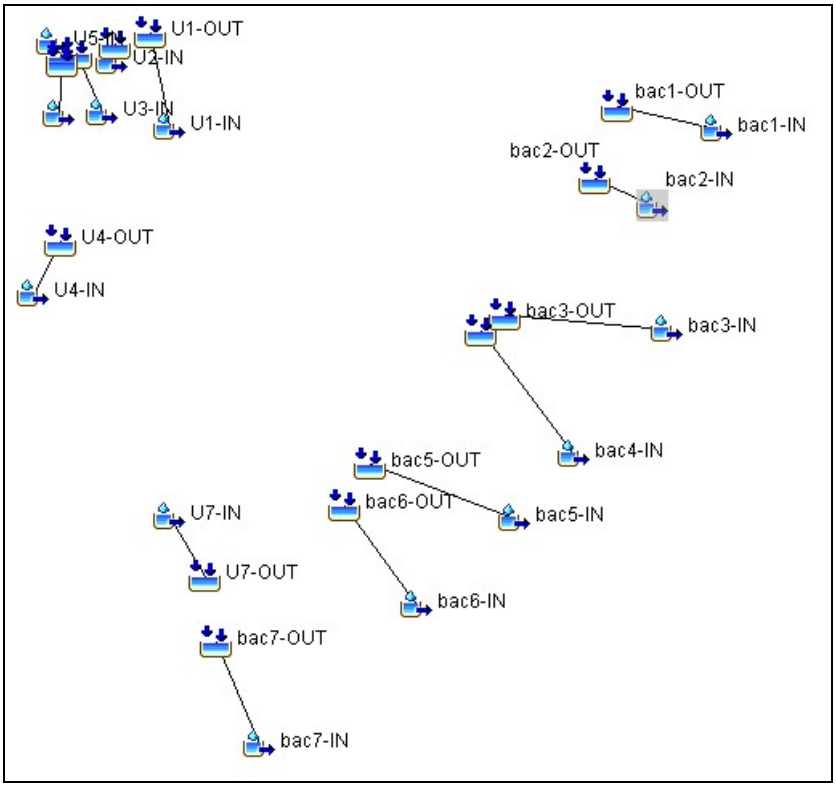


Fig. 44 – Schema del modello idrologico di HEC HMS "Modello Bientina"

Come detto, la tavola **T.4 – Carta di sintesi del modello idrologico "Modello Bientina"** allegata raffigura in modo più chiaro rispetto alla precedente Fig. 44 la schematizzazione del modello idrologico.

Gli scenari idrologici modellati sono quelli con durata di precipitazione pari a 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 24, 36 e 48 ore. Come di seguito specificato, le simulazioni idrauliche sono state eseguite solo per le durate pari a 1, 2 e 24 ore.

Le seguenti tabelle riportano, per ciascun bacino collinare ed urbano, i picchi di portata trentennale e duecentennale per le durate di 1, 2 e 24 ore.

Bacini collinari	Q30 (1-2-24 ore) (mc/s)	Bacini urbani	Q30 (1-2-24 ore) (mc/s)
bac1	6.52 – 4.30 – 0.73	u1	6.11 – 4.16 – 0.69
bac2	1.80 – 1.16 – 0.20	u2	0.78 – 0.47 – 0.07
bac3	9.42 – 6.44 – 1.14	u3	1.04 – 0.65 – 0.11
bac4	4.75 – 3.24 – 0.58	u4	8.75 – 6.01 – 0.99
bac5	4.01 – 2.77 – 0.50	u5	0.47 – 0.28 – 0.05
bac6	5.14 – 3.49 – 0.62	u6	1.76 – 1.12 – 0.18
bac7	5.48 – 3.59 – 0.62	u7	5.05 – 3.10 – 0.50

Tab. 13 – Tabella dei picchi di portata TR30 per i bacini collinari ed urbani per durate pari a 1, 2 e 24 ore

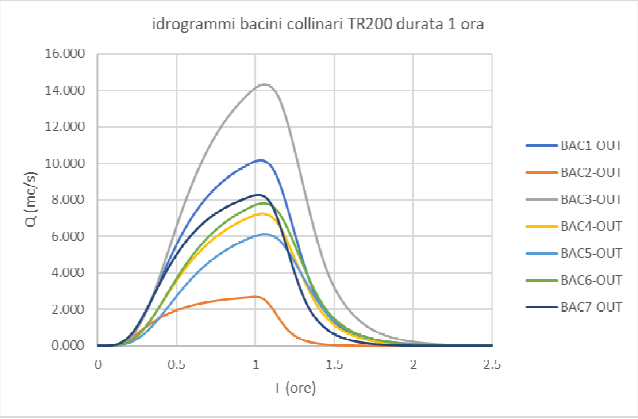
Bacini collinari	Q200 (1-2-24 ore) (mc/s)	Bacini urbani	Q200 (1-2-24 ore) (mc/s)
bac1	10.15 – 6.62 – 1.14	u1	8.89 – 6.05 – 1.05
bac2	2.69 – 1.72 – 0.31	u2	1.11 – 0.68 – 0.12
bac3	14.32 – 9.67 – 1.76	u3	1.50 – 0.94 – 0.16
bac4	7.23 – 4.87 – 0.90	u4	12.69 – 8.74 – 1.51
bac5	6.11 – 4.16 – 0.77	u5	0.67 – 0.41 – 0.07
bac6	7.81 – 5.25 – 0.95	u6	2.54 – 1.62 – 0.28
bac7	8.26 – 5.37 – 0.95	u7	7.24 – 4.48 – 0.77

Tab. 14 – Tabella dei picchi di portata TR200 per i bacini collinari ed urbani per durate pari a 1, 2 e 24 ore

Dalle seguenti tabelle si evince come, per tutti i bacini in esame, le portate maggiori si manifestino per la durata di 1 ora; per quelli di superficie inferiore incontriamo il picco anche per durate di pioggia inferiori all'ora, come si desume dalla forma degli idrogrammi delle seguenti figure.

E' opportuno osservare anche come le portate dei bacini urbani, in particolare dei bacini più grandi (u1, u4 e u7), afferendo al reticolo solo attraverso scaricatori di piena del sistema fognario, difficilmente potranno raggiungere detti valori, piuttosto una parte permarrà più a lungo in rete ed eventualmente potranno generarsi rigurgiti del sistema fognario. Pertanto l'assunzione, nel modello, di tali apporti da parte dei bacini urbani è da ritenersi senz'altro cautelativa.

A titolo di esempio, sono di seguito mostrati gli idrogrammi relativi ad ogni singolo bacino collinare o urbano per le 3 durate considerate ed il tempo di ritorno duecentennale.



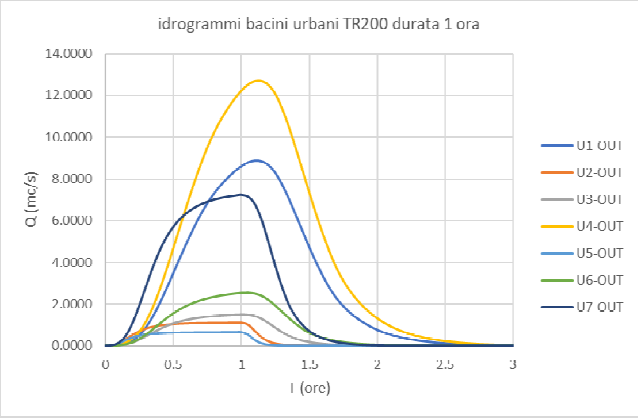
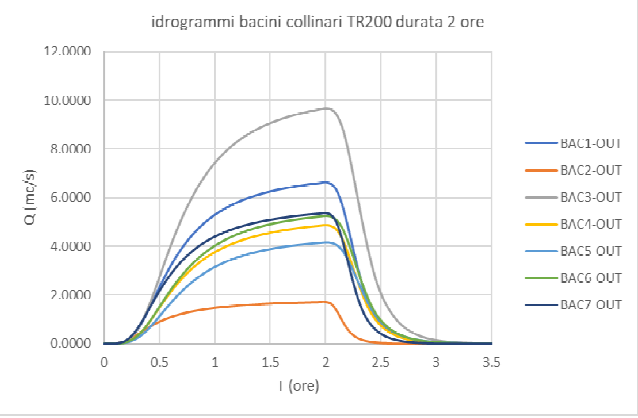


Fig. 45 – Idrogrammi TR200 durata 1 ora



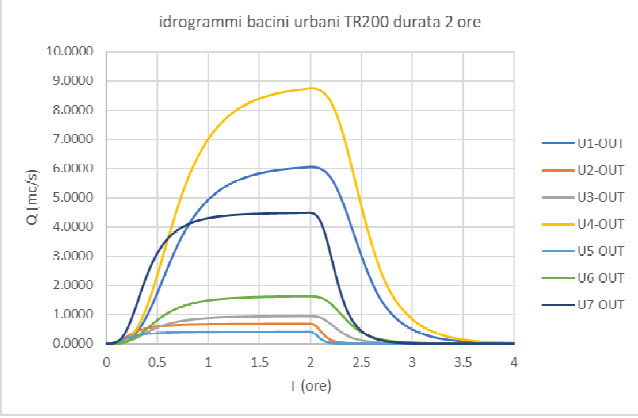


Fig. 46 – Idrogrammi TR200 durata 2 ore

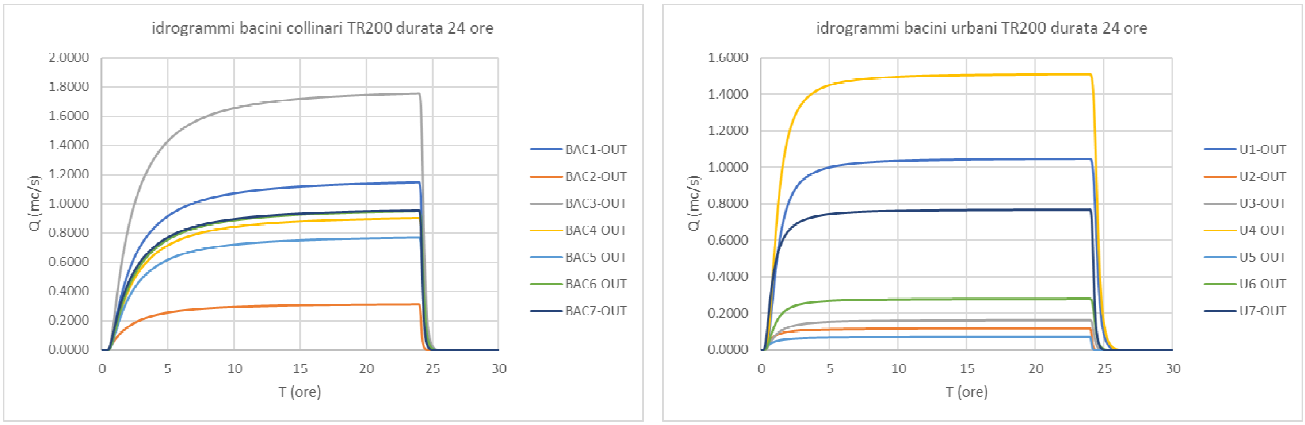


Fig. 47 – Idrogrammi TR200 durata 24 ore

MODIFICHE E INTEGRAZIONI

Come richiesto nel parere della Regione, il modello idrologico appena descritto è stato oggetto di alcune modifiche; o meglio, abbinato al modello appena descritto è stato approntato anche un modello idrologico per valutare l'entità del contributo dei sottobacini di pianura interposti tra quelli collinari (bac1-bac7 di cui sopra) e quelli urbani.

Ciò nell'intenzione di trascurare, nel relativo modello idraulico (capitolo successivo), le dinamiche di propagazione ed eventuale laminazione nella porzione di pianura, su cui si era precedentemente inteso applicare un input meteorico diffuso, e piuttosto simulare, in ottica cautelativa, un apporto idrologico "diretto" sui corsi d'acqua di valle, "avvicinando", per così dire, le acque alle aree urbanizzate.

In questo modello tutta l'area di pianura posta tra la collina e l'abitato di Bientina, afferente in particolare alla Fossa Nuova e al Fosso Fungaia, è stata suddivisa in superfici scolanti e ne è stato valutato il relativo contributo idrologico con la medesima metodologia di cui sopra.

I nuovi bacini di pianura, identificati con le sigle P1-P15, sono mostrati nella successiva figura, unitamente ai bacini collinari ed urbani precedenti.

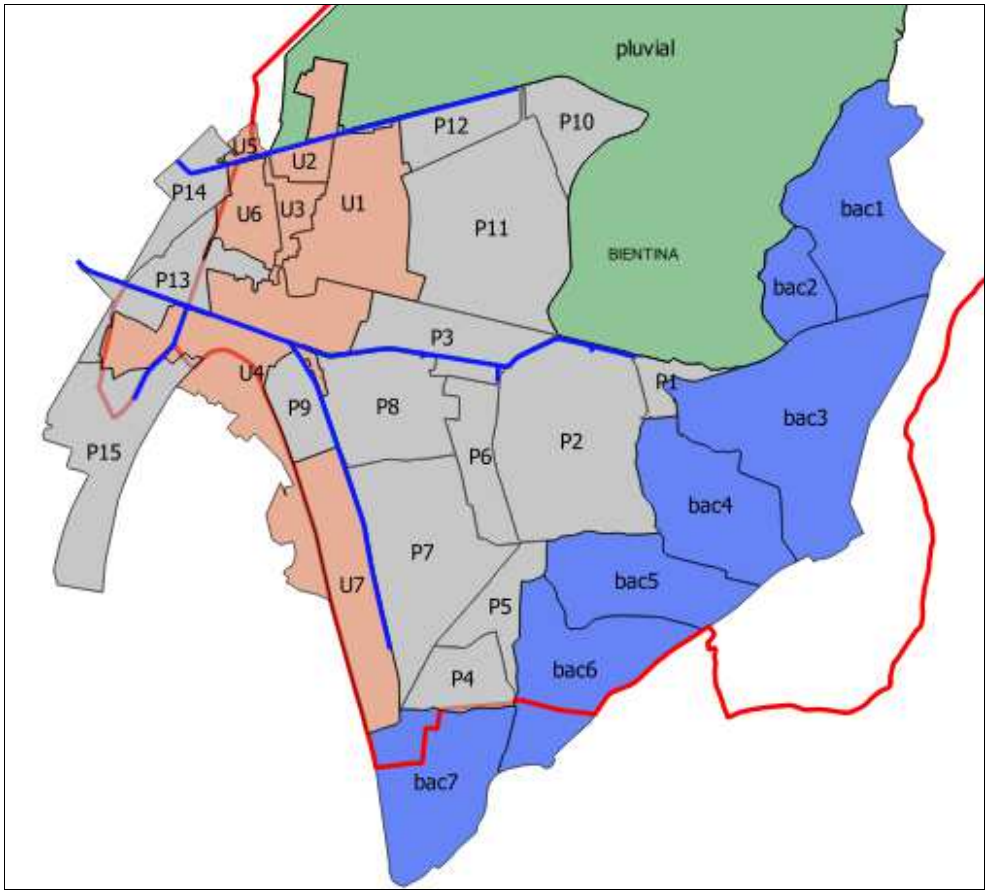
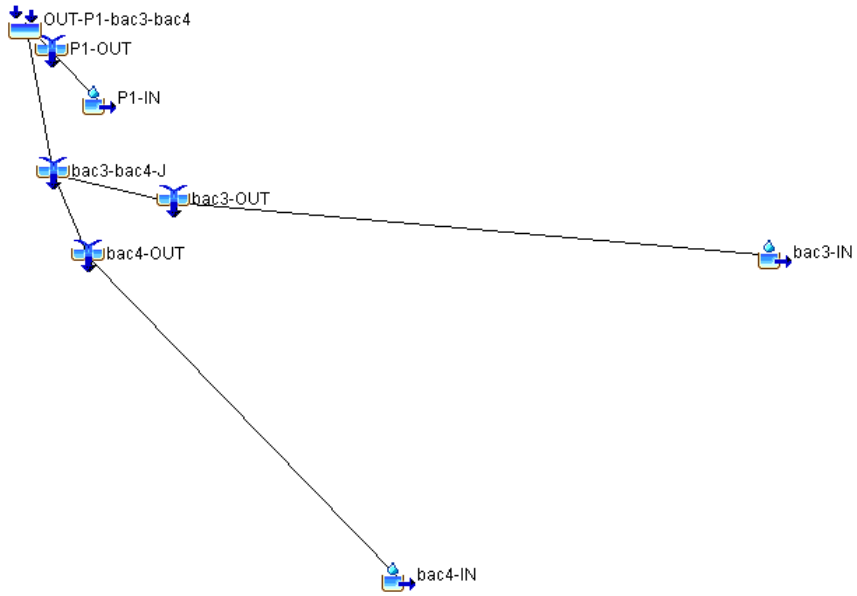
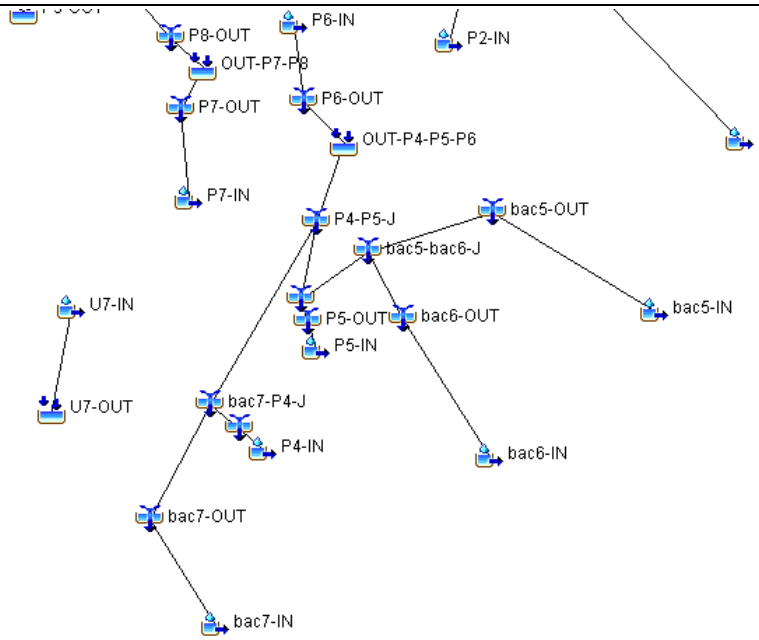
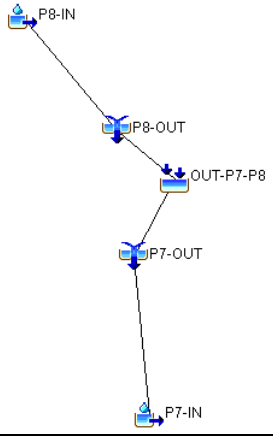
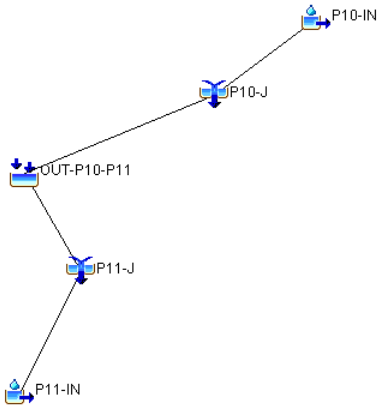


Fig. 48 – Suddivisione in sottobacini delle aree prossime all'abitato di Bientina nel nuovo modello idrologico

Di seguito sono chiarite le principali differenze rispetto al modello idrologico precedente.

Aggiunta del sottobacino P1 che raccoglie le acque di bac3 e bac4 e scarica in testa alla Fosso Nuova.

	Aggiunta del sottobacino *P1* che raccoglie le acque di *bac3* e *bac4* e scarica in testa alla Fossa Nuova (*OUT-P1-bac3-bac4*), come da schema funzionale a fianco
	Collegamento dei bacini *bac7*, *bac6* e *bac5* con i sottobacini di pianura *P4*, *P5* e *P6*, con uscita in *OUT-P4-P5-P6* in testa all'affluente sinistro della Fossa Nuova, come da schema funzionale a fianco
	Aggiunta dei sottobacini *P7* e *P8* con uscita in *OUT-P7-P8* in testa al Fosso di San Piero, come da schema funzionale a fianco

	Aggiunta dei sottobacini *P10* e *P11* con uscita in *OUT-P10-P11* in testa al Fosso Fungaia, come da schema funzionale a fianco

Tab. 15 – Principali differenze del nuovo modello idrologico rispetto a quello precedente

A di là dei dettagli di cui alla precedente tabella, i contributi di tutti gli altri sottobacini di pianura sono stati valutati singolarmente ed inseriti nel modello idraulico come input laterale o distribuito, ad eccezione del bacino P15 che è stato posto in testa al Fosso Cilecchio.

LA seguente figura, benché non facilmente leggibile, riporta lo schema complessivo del modello idrologico di HEC HMS.

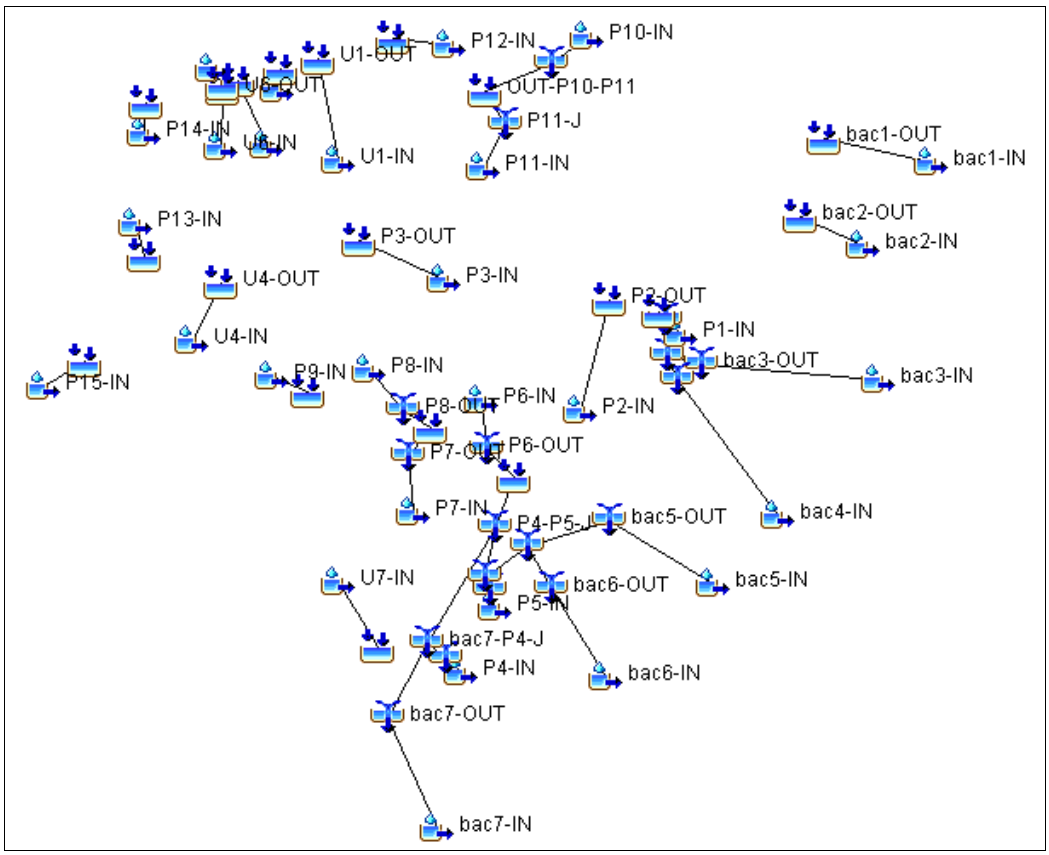


Fig. 49 – Schema del modello idrologico di HEC HMS "Modello Bientina" con sottobacini di pianura

Essendo stati inseriti questi nuovi sottobacini di pianura nel modello idrologico, l'area destinata ad accogliere, nel modello idraulico, il semplice input meteorico si limita adesso alla sola porzione Nord, non afferente ai fossi che attraversano l'area urbana bensì all'idrovora del Puntone.

La seguente figura riassume, per ciascun sottobacino di pianura, il corso d'acqua ricettore.

tipo	nome	recettore	sup
idro	P1	fossanuova	62721
idro	P10	fungaia	174445
idro	P11	fungaia	653934
idro	P12	fungaia	150064
idro	P13	fossanuova	222988
idro	P14	fungaia	138310
idro	P15	cilecchio	393244
idro	P2	fossanuova	660949
idro	P3	fossanuova	239315
idro	P4	affl3_fossanuova	146953
idro	P5	affl3_fossanuova	137667
idro	P6	affl3_fossanuova	165820
idro	P7	sanpiero	508755
idro	P8	sanpiero	312790
idro	P9	affl1_fossanuova	121333
piogge	pluvial	------	9088852

Fig. 50 – Sottoabacini di pianura con proprio fosso ricettore

Di seguito sono mostrate tabelle riepilogative ed alcuni idrogrammi relativi ai bacini di pianura secondo questo nuovo modello idrologico.

Bacini collinari	**Q30 (1-2-24 ore) (mc/s)**	**Bacini urbani**	**Q30 (1-2-24 ore) (mc/s)**
OUT-P1-bac3-bac4	14.95 – 10.20 – 1.81	P15	5.41 – 3.49 – 0.59
OUT-P10-P11	10.68 – 7.26 – 1.24	P2	8.94 – 5.79 – 0.99
OUT-P4-P5-P6	20.92 – 13.93 – 2.43	P3	3.62 – 2.21 – 0.36
OUT-P7-P8	11.02 – 7.26 – 1.23	P4	2.10 – 1.32 – 0.22
P1	0.85 – 0.53 – 0.09	P5	1.98 – 1.25 – 0.21
P10	2.36 – 1.52 – 0.26	P6	2.37 – 1.51 – 0.26
P11	8.38 – 5.73 – 0.98	P7	6.73 – 4.50 – 0.77
P12	2.21 – 1.36 – 0.23	P8	4.30 – 2.76 – 0.47
P13	3.17 – 1.98 – 0.33	P9	1.75 – 1.08 – 0.18
P14	2.01 – 1.25 – 0.21		

Tab. 16 – Tabella dei picchi di portata TR30 per i bacini di pianura e compositi pianura-collina per durate pari a 1, 2 e 24 ore

Bacini collinari	Q30 (1-2-24 ore) (mc/s)	Bacini urbani	Q30 (1-2-24 ore) (mc/s)
OUT-P1-bac3-bac4	22.71 – 15.33 – 2.80	P15	8.03 – 5.15 – 0.90
OUT-P10-P11	15.97 – 10.76 – 1.89	P2	13.40 – 8.62 – 1.52
OUT-P4-P5-P6	31.59 – 20.83 – 3.73	P3	5.23 – 3.23 – 0.56
OUT-P7-P8	16.42 – 10.77 – 1.89	P4	3.12 – 1.96 – 0.34
P1	1.26 – 0.79 – 0.14	P5	2.93 – 1.85 – 0.32
P10	3.49 – 2.25 – 0.39	P6	3.52 – 2.24 – 0.39
P11	12.52 – 8.51 – 1.50	P7	10.07 – 6.68 – 1.18
P12	3.22 – 2.00 – 0.35	P8	6.39 – 4.08 – 0.72
P13	4.66 – 2.91 – 0.51	P9	2.57 – 1.59 – 0.28
P14	2.96 – 1.85 – 0.32		

Tab. 17 – Tabella dei picchi di portata TR200 per i bacini di pianura e compositi pianura-collina per durate pari a 1, 2 e 24 ore

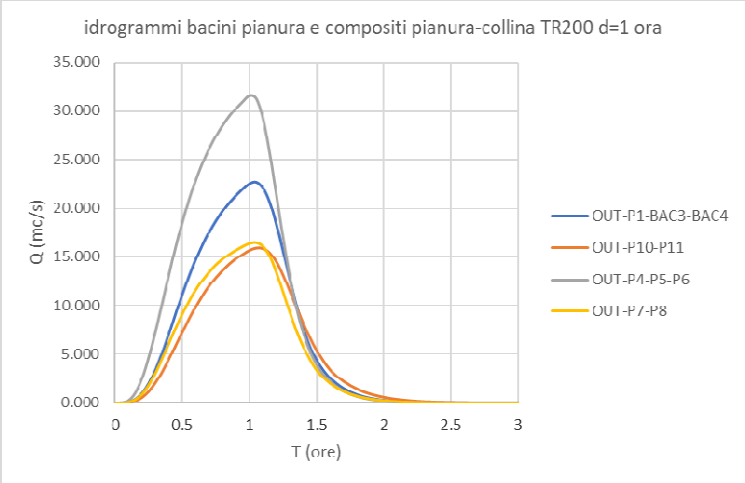


Fig. 52 – Idrogrammi TR200 durata 1 ora

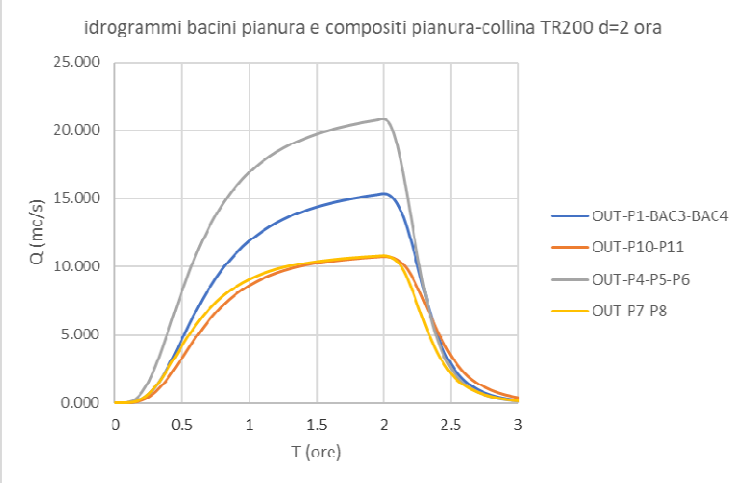


Fig. 53 – Idrogrammi TR200 durata 2 ore

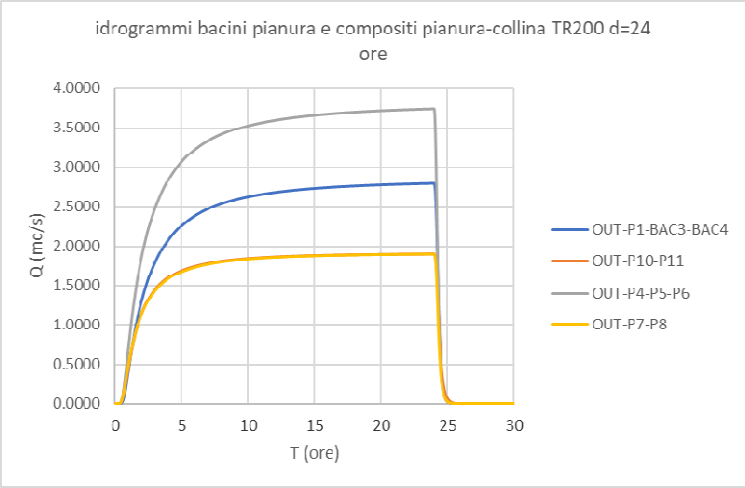


Fig. 54 – Idrogrammi TR200 durata 24 ore

Grazie a questo nuovo modello idrologico sono state eseguite nuove simulazioni idrauliche del modello idraulico "Bientina" con differente distribuzione degli input idrologici, come descritto in calce al successivo Cap. 7.

7. IDRAULICA: IL "MODELLO BIENTINA"

La modellazione idraulica del settore Sud del territorio comunale è stata eseguita in modo del tutto analogo a quella del "Modello Padule".

Trattasi sempre di una modellazione bidimensionale con base topografica a maglia quadrata 3 x 3 m eseguita mediante il software Mike di DHI.

In questo capitolo sono brevemente illustrate le principali caratteristiche del modello idraulico, quali geometria, input idrologici, condizioni al contorno.

7.1 Modello idraulico degli affluenti sinistri del Canale Emissario Bientina

Nel modello geometrico sono state riprodotte numerose aste del reticolo idrografico posto tra il Fosso di Confine ed il limite comunale Sud; in questo caso **le aste sono state rappresentate da sezioni effettivamente rilevate** sul territorio, ad eccezione di alcuni rami secondari per i quali si è fatto ricorso ai dati LIDAR, come nel caso del "Modello Padule".

Il reticolo modellato con le relative sezioni idrauliche è mostrato nella tavola **T.5 – Carta di sintesi del modello idraulico "Modello Bientina"**.

Di seguito è mostrato un estratto della geometria del modello monodimensionale predisposto con il software Mike Hydro.

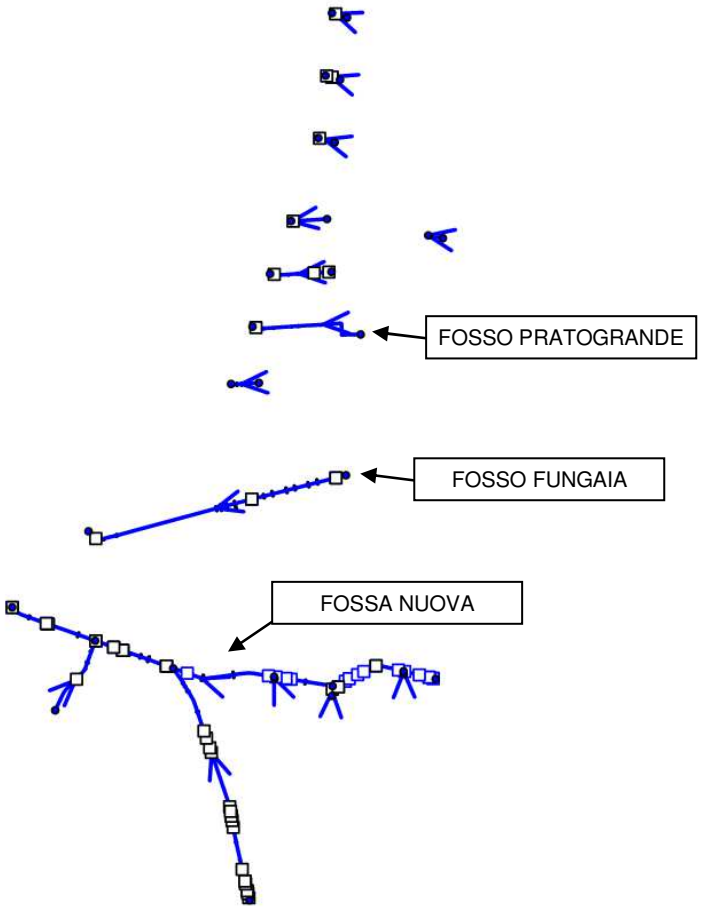


Fig. 55 – Schema del modello idraulico monodimensionale Mike Hydro ("Modello Bientina"

I corsi d'acqua modellati sono tutti gli affluenti sinistri del Canale Emissario a valle del Fosso di Confine; da Nord verso Sud:

- **Fosso Ranocchia**: questo è il fosso posto più a monte, non interferisce con aree urbanizzate, solo case sparse. E' dotato di portella. E' stato modellato solo il tratto terminale, ma, per la presenza di fitta vegetazione in questo tratto non si è potuto eseguire il rilievo, pertanto si è fatto ricorso a sezioni LIDAR.
- **Fosso Presellina**: questo fosso non interferisce con aree urbanizzate, solo case sparse. E' dotato di portella. E' stato modellato solo il tratto terminale con sezioni rilevate, compreso manufatto di scarico nell'Emissario.
- **Fosso Emissarino**: questo fosso non interferisce con aree urbanizzate, solo case sparse. E' dotato di portella. E' stato modellato solo il tratto terminale con sezioni rilevate, compreso manufatto di scarico nell'Emissario.
- **Fosso della Grandoccia**: questo fosso non interferisce con aree urbanizzate, solo case sparse. E' il primo a non essere dotato di portella. Rappresenta il canale di restituzione all'Emissario delle acque provenienti dall'impianto idrovoro del Puntone. E' stato modellato solo il tratto terminale con sezioni rilevate, compreso manufatto di scarico nell'Emissario.
- **"Asta 12"**: questo fosso attraversa l'area industriale di Pratogrande. E' privo di toponimo del reticolo regionale, pertanto nel modello è indicato come "Asta12". Non è dotato di portella. E' stato modellato quasi l'intero tratto con sezioni rilevate, compreso manufatto di scarico nell'Emissario.
- **Fosso di Pratogrande**: questo fosso attraversa l'area industriale di Pratogrande. Non è dotato di portella. E' stato modellato per l'intero tratto con sezioni rilevate, compreso manufatto di scarico nell'Emissario.
- **Fosso Arginetto**: questo fosso è posto a metà strada tra l'area industriale di Pratogrande e l'abitato di Bientina. Non è dotato di portella. E' stato modellato solo il l'intero tratto con sezioni rilevate, compreso manufatto di scarico nell'Emissario.

- **Fosso Fungaia**: questo fosso attraversa l'abitato di Bientina nella parte Nord. Presenta un tratto tombato di lunghezza di oltre 600 m, che torna a cielo aperto al confine con Vicopisano. Non è dotato di portella. Confluisce nell'Emissario con sezione a cielo aperto. E' stato modellato per l'intero tratto, da monte dell'abitato di Bientina alla confluenza con l'Emissario, con sezioni rilevate.
- **Fossa Nuova e affluenti**: questo è il fosso principale che attraversa l'abitato di Bientina, per lunghi tratti coperto. Non è dotato di portella. E' stato modellato per l'intero tratto, dai piedi della collina alla confluenza con l'Emissario, con sezioni rilevate. Sono stati modellati, con sezioni rilevate, anche due ulteriori affluenti della Fossa Nuova, ovvero l'Affluente Sinistro 1 (privo di toponimo e quindi così nominato) che scorre lungo la zona produttiva di Via San Piero ed il Fosso Cilecchio, nell'ultimo tratto al confine con Vicopisano.

Dopo questa descrizione sommaria delle aste modellate segue tabella riepilogativa con nomi e lunghezze di ciascuna di esse.

Si osserva che sono presenti ulteriori aste minori, funzionali alla modellazione per il recapito delle acque di alcuni "capofossi" alla Fossa Nuova (Fosso San Piero, Affl1 e Affl2), nonché un'asta "fittizia" (Grondaccia_tomb) introdotta per simulare la presenza di un lungo tratto tombato a valle dell'idrovora del Puntone.

corso d'acqua	lunghezza (mt)
ranocchia	103.03
presellina	98.5
emissarino	110.03
grondaccia	235.04
grondaccia_tomb	96.92
asta12	400.96
pratogrande	777.35
arginetto	182
fungaia	1751.52
fossanuova	2906.99
cilecchio	532.5
affl1_fossanuova	1604.74
sanpiero	13.71
affl2_fossanuova	17.51
affl3_fossanuova	64.56

Tab. 18 – Elenco aste modellate "Modello Bientina"

Complessivamente la lunghezza delle n. 15 aste modellate risulta pari a circa 8.900 m, con n. 171 sezioni idrauliche quasi interamente rilevate.

A tutte le sezioni è stata applicata una scabrezza di Manning pari a 0.04 $m^{1/3}/s$, come per il "Modello Padule".

La base bidimensionale del modello è costituita anche in questo dal rilievo LIDAR, che copre interamente l'area in esame.

Si è utilizzato lo stesso *raster* ricampionato ad una maglia di 3 x 3 m del "Modello Padule", a cui sono state apportate numerose "correzioni" geometriche depurando la base 2D di quelle interruzioni alle aste dovute alla presenza dei ponti. Ciò è stato fatto solo sul reticolo dei fossi di pianura non modellati in moto monodimensionale; lungo le aste rilevate sono stati riprodotti tutti gli attraversamenti presenti, assai numerosi soprattutto lungo la Fossa Nuova e lungo l'Affl.1_FossaNuova.

A differenza del "Modello Padule", riguardante prevalentemente aree non urbanizzate, in questo caso sono state introdotti nel modello anche tutti gli edifici presenti, "rasterizzando" lo *shp* di tutti i fabbricati avente superficie pianta superiore a 40 mq e ponendo queste celle a quota di *land value* (valore massimo tra le quote del terreno presenti sulla base 2D), come se si trattasse di volumi pieni.

Al terreno sono stati applicati i valori di resistenza, o scabrezza, di Tab. 9, come per il "Modello Padule".

Tutte le aste sono state collegate alla base bidimensionale con appositi link bidirezionale, *lateral link* o *standard link*, in analogia al precedente modello.

Si segnala inoltre che non è stata considerata la presenza dell'idrovora del Puntone, pertanto il modello simula la sola propagazione naturale, per gravità.

Questa assunzione è da considerarsi a favore di sicurezza per le aree che conferiscono le proprie acque a monte dell'idrovora (sostanzialmente tutta la porzione di territorio posta ad Est della Via del Puntone). Allo stesso tempo questa assunzione non determina significative sottostime per l'asta a valle dell'idrovora (Fosso della Grondaccia); infatti il comportamento di questo corso d'acqua è ampiamente rigurgitato dal momento che esso risente molto della condizione di valle. Del resto il Fosso della Grondaccia è il primo corso d'acqua, tra gli affluenti sinistri del Canale Emissario a valle del Fosso Zero, che è privo di portella: con le condizioni di valle adottate esso è caratterizzato da portate negative per tutta la durata degli eventi di piena, compreso l'evento di 24 ore.

La scelta delle condizioni di valle di tutte le aste modellate alla loro confluenza con il Canale Emissario Bientina rappresenta l'aspetto saliente della modellazione.

Come ampiamente riferito, uno degli obiettivi del "Modello Padule" e delle successive elaborazioni con i modelli monodimensionali del solo Canale Emissario Bientina è stato quello di definire quali fossero i livelli idrometrici massimi in alveo da porre come condizione di immissione di tutti gli affluenti sinistri del presente "Modello Bientina".

La scelta, del tutto cautelativa, è stata quella di assumere quali livelli idrometrici alla confluenza quelli scaturiti dalla modellazione monodimensionale del Canale Emissario con portata costante di 35 mc/s per una durata di 48 ore privata delle fuoriuscite in corrispondenza dei tratti arginali sormontati di monte, ovvero quella di cui al secondo profilo della Fig. 43.

Questi livelli risultano i maggiori, in assoluto, tra quelli stimati in tutte le modellazioni precedenti, e sono riportati nella seguente tabella.

corso d'acqua	condizione di valle livello idrometrico del Canale Emissario Bientina (m s.l.m.) e relativa sezione (n°)
ranocchia	7.68 (5)
presellina	7.66 (6)
emissarino	7.64 (7)
grondaccia	7.60 (8)
asta12	7.60 (8)
pratogrande	7.59 (9)
arginetto	7.57 (10)
fungaia	7.55 (12)
fossanuova	7.54 (13)

Tab. 19 – Condizioni di valle delle aste modellate nel "Modello Bientina"

Si specifica che tutti per tutti questi corsi d'acqua, dotati di portella (i primi 3) o meno, la quota di confluenza risulta assai più bassa dei livelli di Tab. 14, quindi per tutti il funzionamento dello scarico è rigurgitato.

Quali input idrologici sono stati assegnati gli idrogrammi calcolati con il modello di cui al Cap 6.

Quelli dei 7 bacini collinari sono stati applicati direttamente alla base bidimensionale, al cambio di pendenza dei fossi provenienti dalla collina; quelli dei bacini urbani sono stati invece applicati sulle aste monodimensionali, o come contributo puntuale o come contributo diffuso.

La posizione di tutti gli input idrologici è indicata sulla tavola **T.5 – Carta di sintesi del modello idraulico "Modello Bientina"**.

Allo stesso tempo sulla restante base bidimensionale (areale rappresentato in **T.5**) sono state applicate direttamente le precipitazioni, negli scenari coerenti con quelli degli idrogrammi.

Gli eventi di piena modellati sono quelli relativi ai tempi di ritorno di 30 e 200 anni con durata di precipitazione pari a 1, 2 e 24 ore.

A titolo di esempio di riportano di seguito i profili idraulici dei corsi d'acqua maggiormente interferenti con l'abitato di Bientina (Fossa Nuova, Affl1_Fossa Nuova e Fosso Fungaia), che poi rappresentano anche i corsi d'acqua modellati di cui sono stati modellati i tratti più estesi dell'asta; tali profili fanno riferimento allo scenario con tempo di ritorno pari a 200 anni e durata di precipitazione pari ad 1 ora.

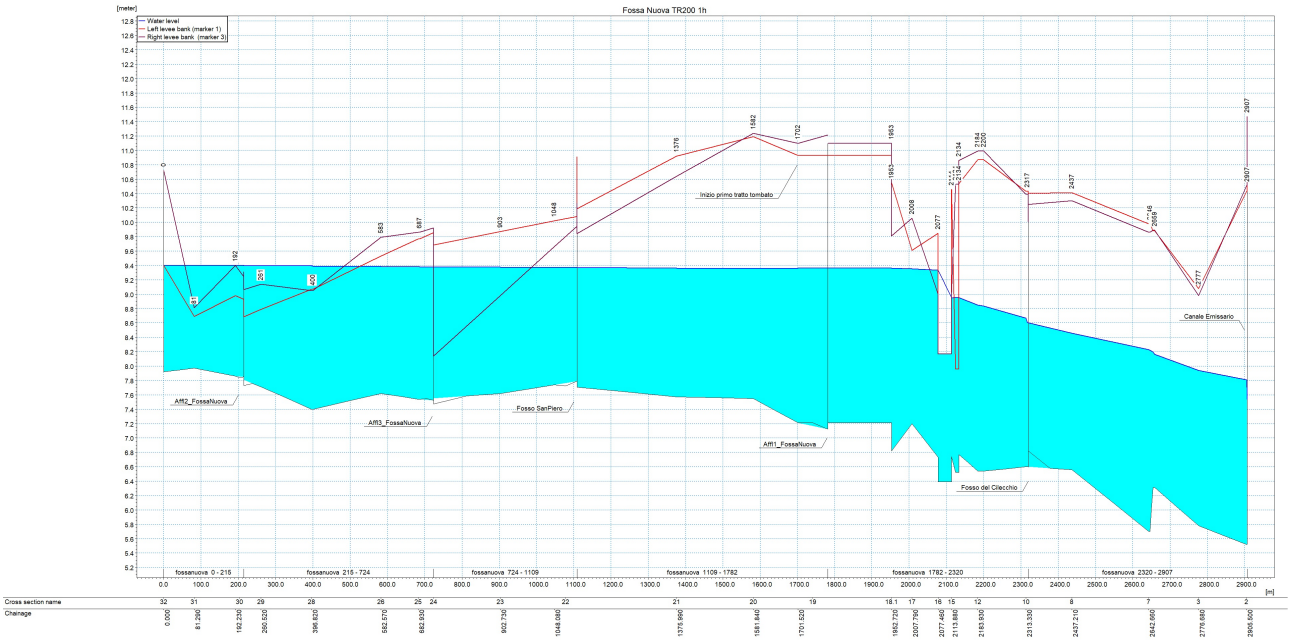


Fig. 56 – Profilo idraulico Fossa Nuova TR200 durata 1 ora

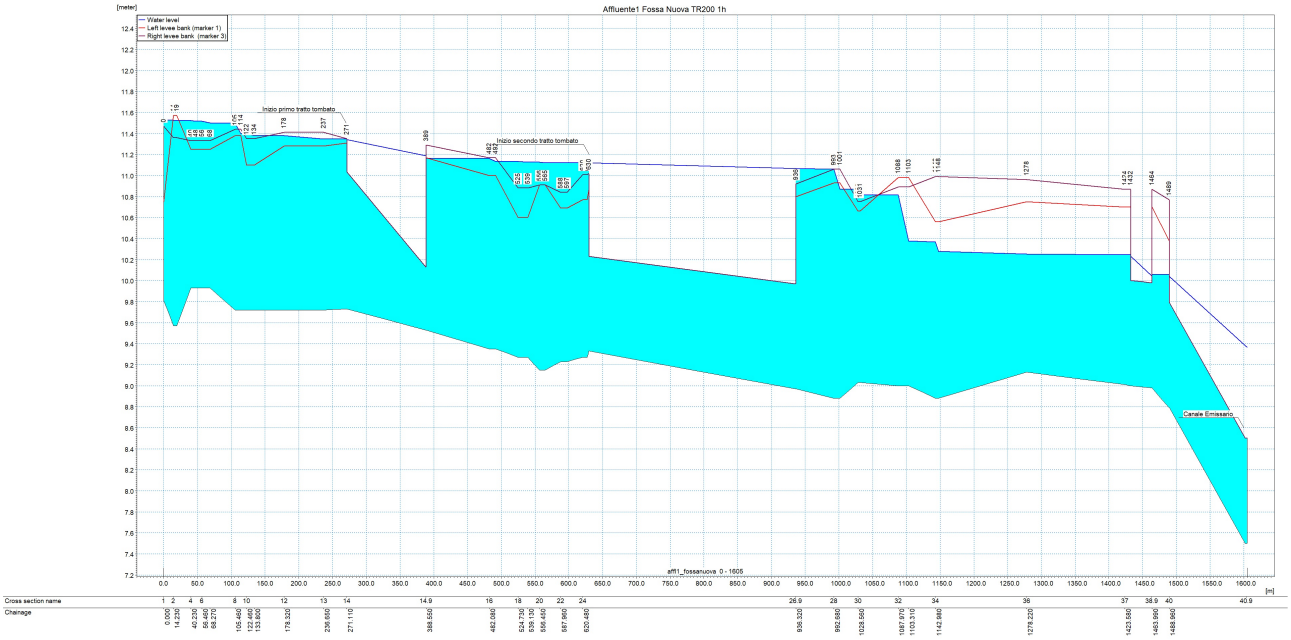


Fig. 57 – Profilo idraulico Affl1_Fossa Nuova TR200 durata 1 ora

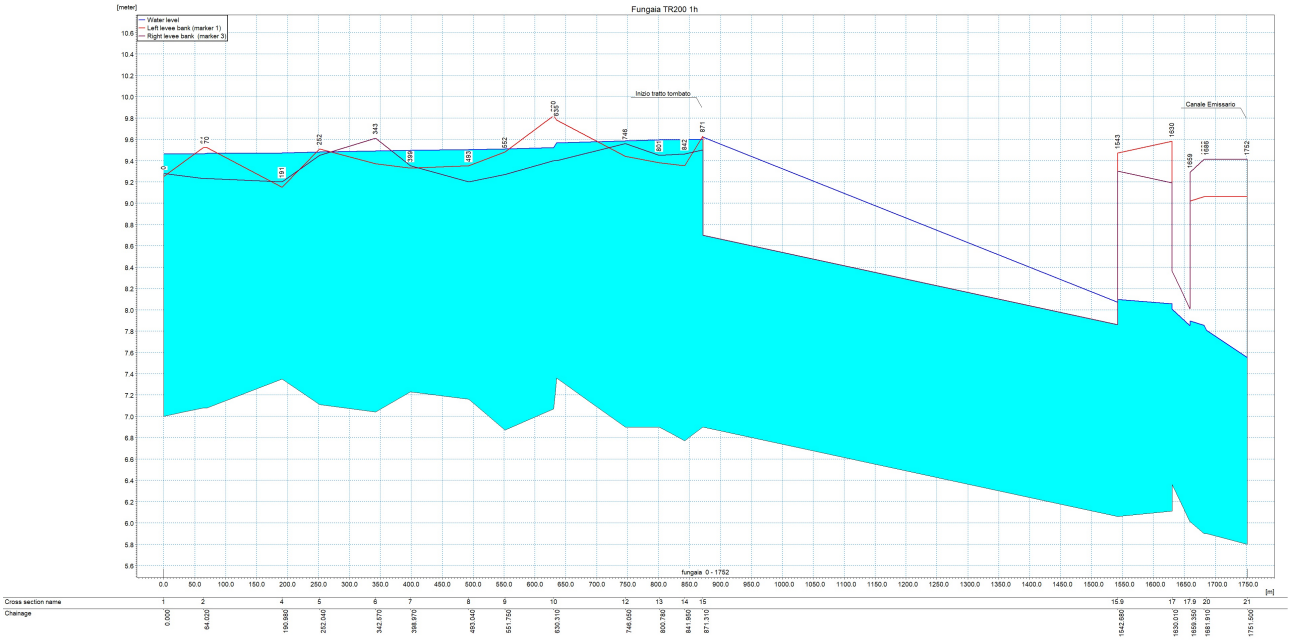


Fig. 58 – Profilo idraulico Fosso Fungaia TR200 durata 1 ora

MODIFICHE E INTEGRAZIONI

Come richiesto dalla Regione, per il modello idraulico "Bientina" sono state eseguite anche ulteriori simulazioni implementando l'idrologia così come descritta in conclusione del capitolo precedente.

Rispetto al modello appena illustrato, per la porzione di territorio suddivisa nei 15 sottobacini di pianura sono stati calcolati specifici idrogrammi ed applicati lungo le aste modellate dei vari corsi d'acqua interessati. Alcuni di questi contributi sono stati posti "in testa" al tratto studiato, altri inseriti come input laterale o diffuso.

Così facendo si è ridotto l'areale su cui applicare direttamente le precipitazioni.

Per tutti gli altri aspetti il modello idraulico non è stato modificato.

7.2 Considerazioni sui risultati della modellazione

La modellazione idraulica della parte Sud del territorio comunale mostra allagamenti diffusi su buona parte dell'area di studio.

Ma tali allagamenti sono principalmente l'effetto del ristagno e della non perfetta efficienza del reticolo e cattive condizioni di deflusso del reticolo di bonifica; per di più, si ricorda che sono state assunte condizioni piuttosto cautelative, soprattutto alla confluenza tra Canale Emissario ed affluenti sinistri, e non è stato considerato l'impianto di sollevamento del Puntone.

Le acque risultano accumularsi soprattutto nelle zone ai piedi delle Colline delle Cerbaie, aventi quote più depresse, e più in generale, lungo tutto il reticolo di scolo ed irriguo che caratterizza l'ampia pianura a Nord e ad Est di Bientina.

Le aree urbanizzate risultano prive di particolari problematiche idrauliche, in quanto i corsi d'acqua che le attraversano presentano una discreta capacità di contenimento, e comunque le volumetrie in transito sono spesso disperse a monte dell'abitato, come accade alla Fossa Nuova, ma anche al Fosso Fungaia.

Anche tutte le case sparse poste lungo la Via del Puntone, che attraversa la pianura da Sud a Nord fino al Fosso di Confine, risultano per lo più poste a quota di sicurezza idraulica, seppur con scarsi franchi e circondate a aree completamente allagate e ristagnanti.

La principale criticità riscontrata, ed anche l'unica riconducibile a una criticità da alluvione e non da ristagno, è quella legata all'esondazione dell'Affluente sinistro della Fossa Nuova che scorre, in parte tombato, lungo Via San Piero.

La presenza di numerosi tombini di ridotte dimensioni rende difficoltoso il deflusso verso valle, causando potenziali allagamenti verso l'area produttiva, anche per il tempo di ritorno di 30 anni.

Dalle modellazioni emerge che, nonostante i bacini di ciascun corso d'acqua studiato siano di piccole dimensioni (anche se non sempre, in un reticolo di bonifica come questo, si è in grado di distinguere il bacino afferente ad un fosso piuttosto che ad un altro, ed è per questo che si è optato per la soluzione di introdurre precipitazioni sulla base 2D anziché azzardare una modellazione idrologica fondata su un'incerta definizione delle superfici scolanti), le aree allagate siano spesso più estese per la durata di 24 ore rispetto a quelle più brevi di 1 o 2 ore.

Questa è l'ulteriore conferma che i fenomeni di ristagno ed accumulo sono prevalenti, ed il territorio si comporta quasi come una vasca dotata di piccoli fori di uscita che non riescono a bilanciare la portata in ingresso; ciò accade sicuramente in condizioni di Canale Emissario in piena, in condizioni normali invece il deflusso è comunque garantito dalle seppur lievi pendenze delle aste, unitamente al lavoro delle idrovore.

I risultati della modellazione sono forniti in termini di pericolosità da alluvione, battenti e velocità rispettivamente nelle tavole **T.6.1 – T.6.5**, **T.7.1 – T.7.5** (TR200), **T.8.1 – T.8.5** (TR200), **T.9.1 – T.9.5** (TR30) e **T.10.1 – T.10.5** (TR30).

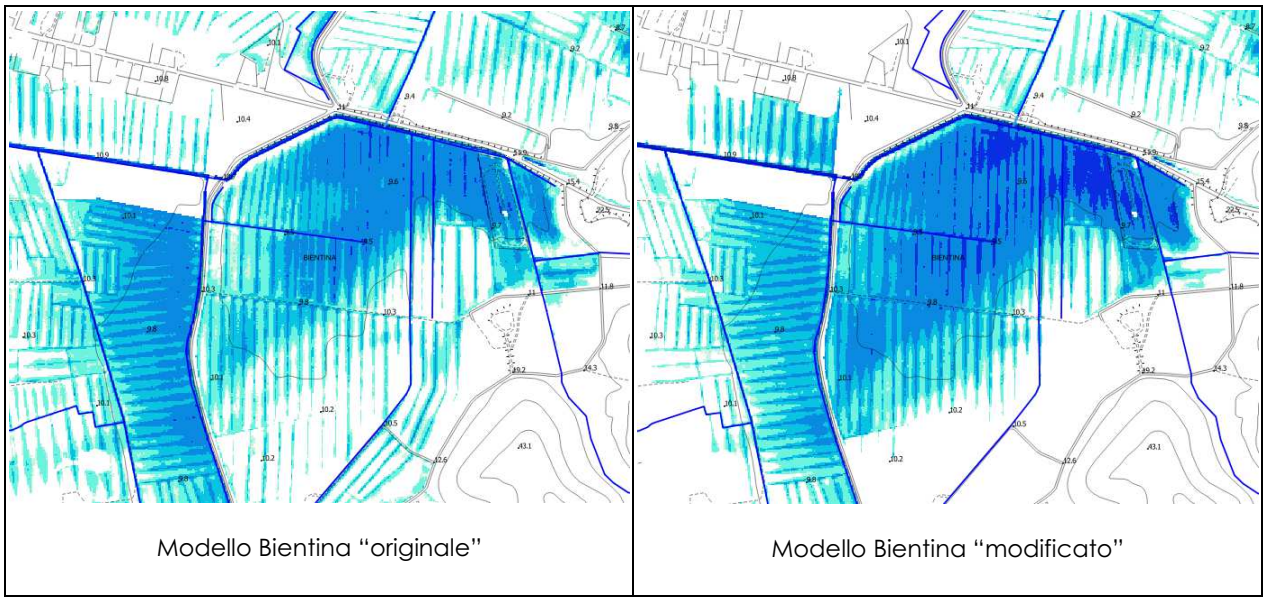
I criteri di restituzione delle nuove pericolosità da alluvione, come meglio esplicitato nel Cap. 8 conclusivo, sono fondati sull'inviluppo dei massimi livelli nei tre scenari di precipitazione considerati.

MODIFICHE E INTEGRAZIONI

Le considerazioni di cui sopra trovano sostanziale conferma anche nelle nuove modellazioni con input idrologico diretto sui corsi d'acqua interferenti con l'abitato.

In questo caso, non risultando allagate le aree di monte (pianura o transizione collina-pianura), le acque paiono accumularsi maggiormente nelle zone più prossime all'abitato, senza però incrementare il rischio lungo i tratti urbani dei corsi d'acqua.

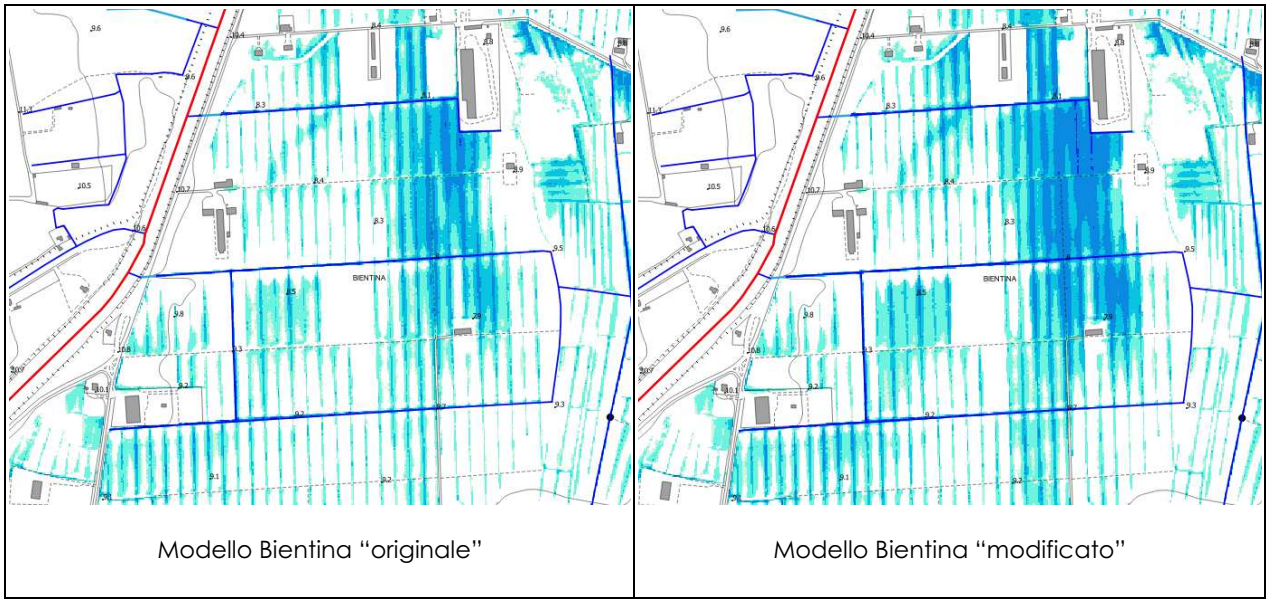
A titolo di esempio, si osserva un lieve aumento dei battenti nell'area depressa lungo la Fossa Nuova a monte dell'abitato, ma una sostanziale conferma dello scenario precedente.



Modello Bientina "originale"	Modello Bientina "modificato"

Fig. 59 – Confronto aree allagate nella piana lungo la Fossa Nuova, a monte dell'abitato di Bientina (scenario TR200 d=2 ore)

Lungo il Fosso Fungaia la nuova distribuzione degli input idrologici determina maggiori fuoriuscite in destra idraulica, che si ripercuotono verso l'area di Pratogrande, a Nord, senza però che siano interessate in modo significativo le aree urbanizzate.



Modello Bientina "originale"	Modello Bientina "modificato"

Fig. 60 – Confronto aree allagate nella piana di Pratogrande, a Nord del Fosso Fungaia e dell'abitato di Bientina (scenario TR200 d=2 ore)

Lungo Via San Piero le aree bagnate risultano inferiori rispetto a quelli della versione precedente dal momento che, non simulando precipitazioni dirette sulla base 2D, non vengono considerate le dispersioni di volumi idrici che si possono invece generare in corrispondenza della transizione collina-pianura.

Modello Bientina "originale" | Modello Bientina "modificato"

Fig. 61 – Confronto aree allagate nella piana lungo la Via di San Piero, a Sud-Est dell'abitato di Bientina (scenario TR200 d=2 ore)

In definitiva, seppur condotte con finalità di maggiore cautela, queste nuove simulazioni non determinano maggiori rischi per le aree urbanizzate; ciò è dovuto al fatto che il profilo dei vari corsi d'acqua analizzati è principalmente legato alla condizione di valle (livello nel Canale Emissario) piuttosto che alla diversa distribuzione dei contributi idrologici lungo le aste.

In ogni caso, le perimetrazioni finali proposte sono, come anticipato, frutto dell'inviluppo delle aree allagate del modello originale e del modello modificato, che hanno entrambi simulati gli scenari di precipitazione di durata pari ad 1, 2 e 24 ore.

8. MAPPE DELLA PERICOLOSITÀ DA ALLUVIONE, BATTENTI, VELOCITÀ E MAGNITUDO IDRAULICA

In questo capitolo sono illustrati i criteri di redazione delle nuove mappe di aggiornamento del quadro conoscitivo idraulico sul territorio comunale ai sensi della L.R. 41/2018.

Gli obiettivi del lavoro erano proprio quelli di pervenire alla definizione di carte aggiornate della pericolosità da alluvione (così come definita nel Piani di Gestione del Rischio Alluvione), e corredare il quadro conoscitivo anche di carte dei battenti, delle velocità e della magnitudo idraulica (ai sensi della L.R (41/2018).

Per fare ciò sono state redatte due distinte modellazioni idrauliche:

- Il "Modello Padule", che ha consentito di studiare le dinamiche di tutto il Padule, compresa la parte ricadente all'interno del territorio comunale di Bientina, e del Canale Emissario Bientina fino alla "Botte", con l'obiettivo principale di determinare i massimi livelli in alveo lungo l'asta del Canale. Grazie a questo modello sono stati definite anche aree allagate, battenti e velocità per la porzione Nord del territorio comunale. Però, dal momento che non sono stati valutati integralmente tutti gli scenari idrologico-idraulici del sistema Padule, ma solo lo scenario duecentennale "massimo", nella zona Nord non sono state tracciate nuove perimetrazioni di pericolosità bensì sono state confermate le attuali pericolosità da alluvione di P.G.R.A.

- Il "Modello Bientina", con cui si sono definite le pericolosità da alluvione della parte Sud del territorio comunale, analizzando tutta l'area di pianura e tutti gli affluenti sinistri del Canale Emissario, compresi quelli che interferiscono con l'abitato di Bientina.

A livello di complessità modellistica, tra i due modelli, sicuramente prevale il "Modello Padule". Ma ai fini urbanistici è il "Modello Bientina" ad assumere maggiore rilevanza, in quanto è con esso che si sono potute rappresentare tutte le interferenze idrauliche con le aree urbanizzate.

Il criterio di assegnazione delle classi di pericolosità da alluvione è stato il seguente.

MODIFICHE E INTEGRAZIONI

Per la parte Nord, quella mappata attraverso il "Modello Padule", sono stati trascurati i risultati del modello in termini di aree allagate, battenti e velocità, pertanto **sono state confermate le attuali pericolosità da alluvione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni**.

Così facendo la parte Nord risulta priva di indicazioni circa battenti, velocità e magnitudo idraulica ai sensi della L.R. 41/2018 e D.P.G.R. 5R/2020.

Per la parte Sud la pericolosità da alluvione è stata differenziata esattamente sulla base delle risultanze delle modellistiche idrauliche, prendendo come massima estensione delle aree bagnate quella risultante dall'inviluppo dei vari scenari studiati, sia per TR30 che per TR200, sia nella versione originale (quella priva di sottobacini di pianura nella parte più prossima al capoluogo) che nella versione modificata a seguito della richiesta di integrazioni da parte della Regione.

E' stata assegnata la **pericolosità da alluvione elevata P3** alle aree interessate da **allagamenti con tempo di ritorno pari a 30 anni**, e la **pericolosità da alluvione media P2** a quelle interessate da **allagamenti con tempo di ritorno pari a 200**.

Come ben visibile dagli elaborati grafici allegati, la modellazione, in tutti gli scenari simulati, ha dato risposte non dissimili tra TR30 e TR200, almeno in termini di estensione delle aree bagnate. Questo perché il territorio non è in grado di smaltire, attraverso il reticolo di bonifica, i volumi prodotti da precipitazioni di notevole intensità, che quindi tendono ad accumularsi in special modo nelle aree più depresse. Oltretutto è importante ricordare che il "Modello Bientina" è prevalentemente un modello *pluvial*, ovvero la forzante è rappresentata da una precipitazione diffusa su quasi tutta l'area in esame, che quindi distribuisce in modo più omogeneo i volumi sul territorio.

Ma anche forzando gli idrogrammi direttamente lungo le aste (versione aggiornata del modello a seguito della richiesta di integrazioni) i risultati nei due scenari sono similari.

Inoltre non va dimenticato che è stata adottata una condizione di valle assai gravosa, che di fatto azzera il recapito nel Canale Emissario da parte di tutti i suo affluenti sinistri quindi la risposta del territorio ad eventi trentennali e duecentennali risulta equiparabile.

La base bidimensionale del modello riceve ma non smaltisce, e ciò necessariamente produce estese aree allagate.

Seppur non caratterizzate da dinamiche di tracimazione più tradizionali, piuttosto da ristagni e inefficace deflusso, a queste aree sono state comunque associate le relative classi di pericolosità da alluvione come indicato all'art. 6 della Disciplina del P.G.R.A.

Con questi risultati e queste assegnazioni si evidenzia che, complessivamente, sul territorio comunale è incrementata la classe di pericolosità da alluvione rispetto alle mappe attuali del P.G.R.A.; sono fatte salve buona parte delle aree urbanizzate, che effettivamente sono collocate a quote superiori e quindi risultano in sicurezza idraulica anche rispetto ad eventi di piena duecentennali.

In abbinamento a queste nuove classi di pericolosità da alluvione, sono state redatte nuove mappe dei battenti e delle velocità, in modo da poter ricostruire, ai sensi della L.R. 41/2018, anche la carta della magnitudo idraulica.

Le mappe dei battenti e delle velocità sono proposte sia nello scenario duecentennale che in quello trentennale.

Per una migliore lettura queste carte sono state redatte sia ad una scala di sintesi su tutto il territorio (scala 1:10.000) che ad una scala di dettaglio, limitatamente al territorio urbanizzato (scala 1:2.000).

Sono allegate al presente lavoro quindi le carte della pericolosità da alluvione, da **T.6.1** a **T.6.5**, le carte dei battenti TR200 e TR30, rispettivamente da **T.7.1** a **T.7.5** e da **T.9.1** a **T.9.5**, le carte della velocità TR200 e TR30, rispettivamente da **T.8.1** a **T.8.5** e da **T.10.1** a **T.10.5**, e la carta della magnitudo idraulica **T.11**.

Si segnala infine, come richiesto dalla Regione Toscana, che il presente studio idraulico ha interessato tratti di corsi d'acqua ricadenti e/o potenzialmente interferenti con il territorio comunale di Vicopisano, quali il Fosso Fungaia, la Fossa Nuova e il Fosso Cilecchio.

Di seguito è mostrato un estratto della porzione di territorio al confine tra Bientina e Vicopisano con restituzione delle aree a pericolosità da alluvione anche su quest'ultimo.

Le perimetrazioni delle aree a pericolosità da alluvione in formato shp sono fornite in allegato al presente lavoro, comprese quelle che interessano il Comune di Vicopisano.

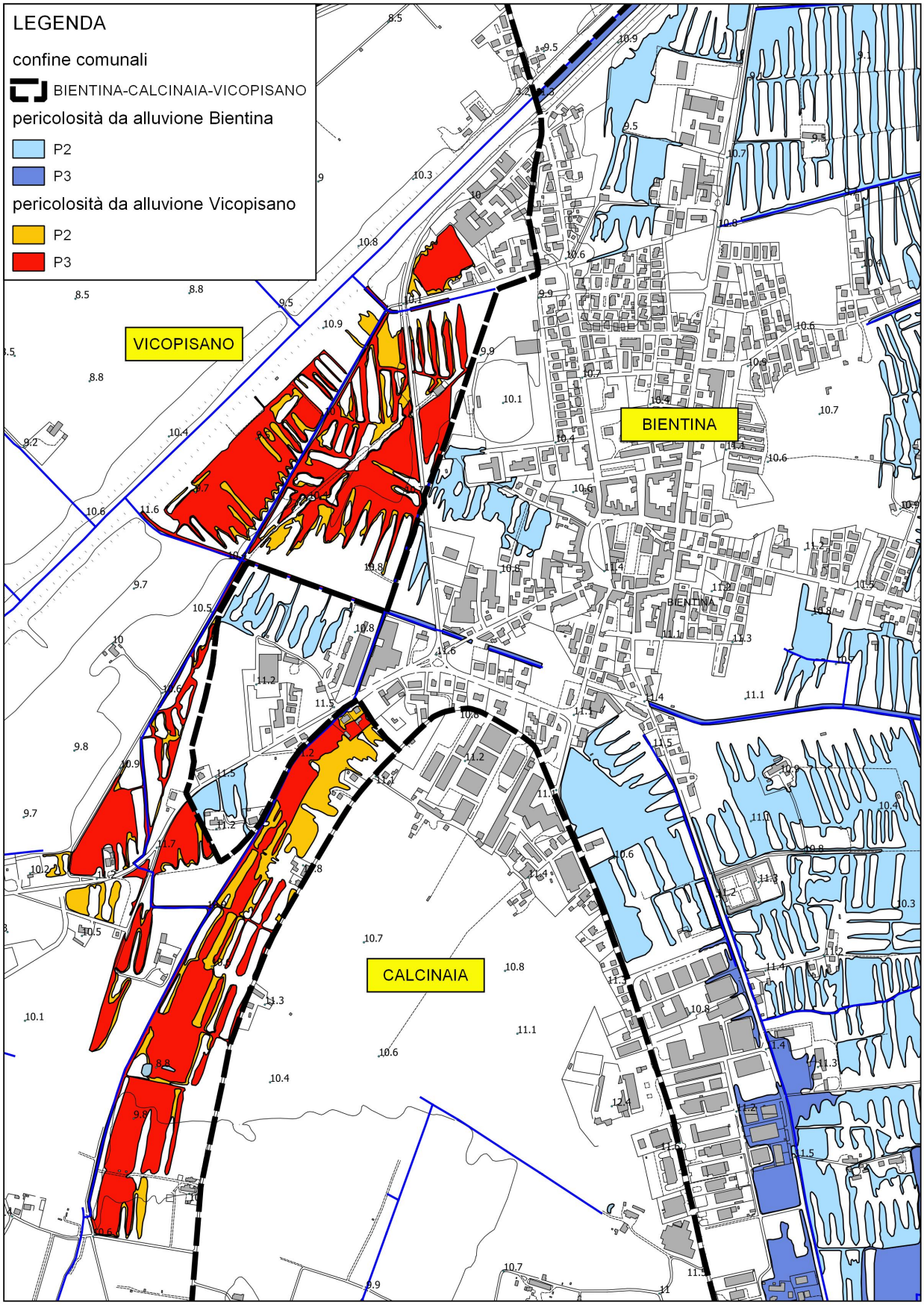


Fig. 62 – Particolare delle aree a pericolosità da alluvione al confine tra Bientina e Vicopisano