

PARTE IV

METODOLOGIA OPERATIVA

METODOLOGIA OPERATIVA PER LA PERIMETRAZIONE DELLE AREE A PERICOLOSITA'

PERICOLOSITA IDRAULICA

Criteri generali

L'indagine per l'individuazione e la perimetrazione delle aree a pericolosità idraulica è stata svolta, come già detto, con riferimento a due livelli, di sintesi e di dettaglio e rappresentata a altrettante scale cartografiche. Il livello di sintesi, rappresentato in scala 1:25000, raccoglie sostanzialmente le informazioni di ordine geomorfologico e la memoria storica del territorio filtrata criticamente, almeno per quanto attiene le fasce a pericolosità più elevata, da quasi due anni di vaglio, dato dalla applicazione del piano straordinario. Il livello di dettaglio, costituito dal mosaico di stralci in scala 1:10000, presenta invece i risultati dell'applicazione di specifici modelli idrologici e idraulici. Il Piano, in questo caso, fissa lo standard metodologico di base attraverso il quale si operano stime affidabili sull'estensione delle aree inondate per diversi tempi di ritorno. Ambedue i quadri, storico e analitico, possono essere migliorati, integrati, affinati nel tempo, seguendo le esigenze della corretta pianificazione e gestione del territorio. In questo contesto va rivendicato, ancora una volta, il carattere dinamico, in continua evoluzione, della pianificazione di bacino.

Il livello di sintesi

Riguarda la individuazione e perimetrazione di aree riferite a quattro classi di pericolosità idraulica, ed è esteso all'intero territorio del bacino non coperto dagli stralci del mosaico di dettaglio. I criteri per la perimetrazione sono, come si è detto, di ordine geomorfologico e storico-inventariale. La sua consistenza, nel corso degli aggiornamenti del piano, tenderà a ridursi per giungere all'obiettivo finale di un'unica perimetrazione alla scala 1:10000.

La documentazione disponibile presso l'Autorità di Bacino, e utilizzata a supporto dell'indagine comprende:

1. la cartografia allegata al Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 5 novembre 1999, *Approvazione del Piano Stralcio relativo alla riduzione del Rischio Idraulico del bacino del fiume Arno*, che individua le aree soggette ad inondazioni ricorrenti od eccezionali sulla base degli eventi significativi verificatisi nel periodo 1966-1999. In tale cartografia risultano distinguibili in particolare:
 - a. aree soggette ad inondazione eccezionale;
 - b. aree soggette ad inondazione ricorrente;
 - c. aree interessate da inondazioni durante gli eventi alluvionali degli anni 1991, 1992, 1993,
2. la documentazione relativa all'adozione delle misure di salvaguardia per le aree a pericolosità idraulica molto elevata individuate e perimetrare nel *Piano straordinario per la rimozione delle situazioni a rischio idrogeologico più alto nel bacino del fiume Arno*. In particolare vengono distinte:
 - a. aree a pericolosità idraulica molto elevata (P.I.4);
 - b. aree a rischio idraulico per le quali è stato dichiarato lo stato di emergenza ai sensi dell'art.5 L. 24/2/92 n.225 (P.I.4);

- c. aree investite dagli eventi del 1998 e del 1999 (P.I.4);
- d. aree alle quali e' esteso quanto previsto dalla delibera del Consiglio Regionale della Toscana n. 230/94 per l'ambito definito "B" della stessa. (B.I.);
- e. aree di ristagno.

Su base geomorfologica risultano invece disponibili le elaborazioni svolte dall'Autorità di bacino relativamente alla perimetrazione di aree inondabili alla scala 1:25.000 e estesa a tutto il bacino del fiume Arno. A tale perimetrazione viene assegnato convenzionalmente un tempo di ritorno pari a 500 anni.

Per le aree a pericolosità molto elevata o *P.I.4*, è stata dunque adottata, nella sostanza, la perimetrazione già individuata per il Piano straordinario ex D.L. 180/98. Questa, con l'eccezione delle aree idraulicamente connesse all'asta principale, fu ai tempi effettuata su criteri esclusivamente storici. In particolare furono prese in considerazione le aree già individuate nella *Carta guida delle aree allagate*, facendo riferimento alle inondazioni storiche successive al 1966. È da osservare come tale perimetrazione, nel periodo intercorso tra la adozione del Piano straordinario e la redazione del *PAI* ha subito il filtro dato da due anni di vigenza che, attraverso le osservazioni presentate dagli Enti territoriali interessati, ha corretto alcuni errori materiali e ha modificato l'estensione di quelle aree ove, nel periodo considerato, fossero intercorsi interventi tesi alla riduzione della pericolosità e dell'esposizione al rischio.

Le aree a pericolosità *elevata* o *P.I.3* sono state anch'esse perimetrate con riferimento al Piano straordinario. In particolare sono state ascritte a tale classe le aree indicate nel piano con la sigla *B.I.* Si tratta di aree soggette anch'esse a inondazioni con frequenza relativamente elevata ma per le quali era vigente il regime normativo previsto dalla Delibera CRT 230/94, adesso recepita nel *PIT*, per gli ambiti "B".

Le aree a pericolosità *media* o *P.I.2* sono state individuate nella fascia compresa tra le aree a *Pericolosità idraulica 3 e 4* ed l'inviluppo delle massime alluvioni storiche risultante dalla Carta Guida delle aree allagate. Nella sostanza si tratta di aree inondate in occasione dell'evento del 1966 e non soggette ad inondazioni ricorrenti.

Le aree a pericolosità *bassa* o *P.I.1* sono comprese tra l'inviluppo delle massime alluvioni storiche di cui sopra e il limite delle *alluvioni di fondovalle*. Tale limite è stato tracciato con criteri geomorfologici sulla base della revisione e aggiornamento del dato in possesso dell'Autorità alla scala 1:100.000, tramite fotointerpretazione tematica delle riprese aerofotogrammetriche in scala 1:50.000, eseguite sull'Arno e sui principali affluenti tra il maggio 1993 e l'Agosto 1995.

Tabella 18: Classificazione della pericolosità idraulica per le aree inondabili ricavate su base geomorfologica e su base storico-inventariale

Tipologia	Fonte	P.I.4	P.I.3	P.I.2	P.I.1
Geomorfologica	Autorità di Bacino				Studio geomorfologico
Storico-inventariali (1966-1999)	DPCM 5/11/99 (Piano stralcio)	Eventi alluvionali 1991, 92 e 93	Eventi ricorrenti	Eventi eccezionali	
Storico-inventariali (1966-1999)	Delibera Comitato Istituzionale n. 135 del 27/10/99 e seguenti	Aree dichiarate in stato di emergenza (art.5 L. 24/2/92 n.225)	Aree ricadenti in ambito "B" (DCR 230/94)	Aree di ristagno	
Aree alle quali è estesa la norma dell'ambito "B" ex DCR 230/94		Aree investite dagli eventi 1998-99			

Il livello di dettaglio

GENERALITÀ

La perimetrazione e individuazione delle aree a rischio, per quanto attiene al livello di dettaglio, si articola in quattro fasi.

1. *Individuazione e caratterizzazione dell'ambito fisico oggetto di studio*: Comprende i criteri per la definizione del reticolo idrografico, il bacino principale e i sottobacini oggetti di studio, nonché per la predisposizione del quadro conoscitivo necessario alle elaborazioni previste nelle fasi successive;
2. *Analisi idrologica*: è finalizzata alla determinazione degli eventi di piena, caratterizzati dall'andamento temporale della portata per assegnata frequenza per ciascuna sezione significativa del tronco fluviale considerato. La metodologia di valutazione degli idrogrammi di piena, omogenea per tutti i bacini idrografici oggetto di studio, si basa essenzialmente sulla regionalizzazione delle portate di piena;
3. *Modellazione idraulica in alveo e nelle aree inondate*: consente, per ciascuna sezione, la determinazione dei livelli idrici associati agli eventi di piena definiti nella fase precedente nonché, in caso di insufficiente capacità di smaltimento, la stima dei volumi d'acqua tracimati;
4. *Perimetrazione delle aree inondabili*: comprende le attività inerenti la delimitazione delle aree inondate in forma automatica e/o manuale utilizzando eventualmente un modello digitale del terreno la cartografia disponibile;

Si descrivono nel seguito i degli operativi per le diverse fasi.

IL QUADRO CONOSCITIVO DI BASE

Comprende i criteri per la definizione del reticolo idrografico, i bacini oggetto di studio, nonché per la predisposizione del quadro conoscitivo necessario alle elaborazioni previste nelle fasi successive, in particolare:

- a. acquisizione degli studi esistenti sulla perimetrazione delle aree a pericolosità e rischio idraulico disponibili presso l'Autorità di Bacino e gli altri enti territoriali, anche per quanto concerne il supporto alla redazione degli strumenti urbanistici;
- b. raccolta, disamina e valutazione dei dati disponibili, specialmente per quanto attiene al rilievo delle sezioni trasversali, e individuazione dei tronchi su quali è possibile procedere all'indagine numerica;
- c. programmazione di eventuali indagini integrative sulla base dei capitolati e delle linee guida prodotti dall'Autorità e loro integrazione nel Sistema Informativo Territoriale dell'Amministrazione;
- d. delimitazione del bacino idrografico drenante nei tronchi di interesse con particolare attenzione alle zone di pianura, alle aree di irrigazione e bonifica ove le infrastrutture idrauliche e viarie e ferroviarie possono determinare il perimetro delle aree contribuenti. Sono in questo caso da prevedere sopralluoghi e indagini specifiche presso gli Enti competenti;
- e. definizione della rete idrografica attraverso l'acquisizione della cartografia disponibile alle diverse scale di interesse, individuazione dei tronchi in studio, classificazione in funzione delle normative nazionali e regionali vigenti, eventuale gerarchizzazione;
- f. caratterizzazione geometrica dei tronchi di interesse mediante l'analisi e la validazione delle sezioni trasversali e l'attribuzione dei coefficienti di scabrezza.

LA MODELLISTICA IDROLOGICA

Ha la finalità di generare, per tutte le sezioni di interesse del reticolo idrografico considerato, gli idrogrammi di piena per assegnati tempi di ritorno. L'obiettivo è quello di riprodurre andamenti temporali della portata caratteristici delle diverse aree, ricollegati a diverse forzanti meteorologiche che provocano la risposta critica di bacini e sottobacini di diversi ordini di grandezza.

È noto che il meccanismo di formazione della piena, nella realtà, è sicuramente influenzato dall'evoluzione dinamica dei campi di precipitazione e cioè da come il nucleo principale della precipitazione si sposta all'interno del bacino, coinvolgendo in tempi differenti porzioni diverse del bacino, e influenzando così l'effettiva sovrapposizione dei contributi dei diversi bacini in termini di idrogramma di piena.

Ciò potrebbe essere riprodotto in fase di verifica solo impostando una generazione casuale di eventi di precipitazione, di diversa intensità, durata ed evoluzione temporale. Al di là dell'onere dei calcoli e della non riproducibilità delle condizioni di verifica, tale scenario di analisi, seppur idrologicamente molto sensato, non permetterebbe un'agevole caratterizzazione in termini di tempo di ritorno degli eventi. È, ancora una volta, da ribadire il carattere dello studio in esame che tende a fornire eventi di riferimento sui quali, in fasi di eventuale, successivo approfondimento, è possibile andare ad effettuare analisi con maggiori livelli di approssimazione.

Questo ragionamento riconduce, nella sostanza, ad una ipotesi di apparente *isofrequenza* tra la forzante meteorica, ritenuta uniforme sull'intero bacino, e la portata in alveo. Di tale argomento sarà tuttavia discusso più avanti, nell'ambito della discussione del modello. Si considerano ietogrammi di durata tale da rendere massime le portate di piena nella parte alta, nella parte intermedia e nella parte finale del bacino.

La modellistica idrologica è stata affidata al codice di calcolo ALTO (*ALLuvioni in TOscana*), sviluppato nel 1997 dal PIN, Centro Studi Ingegneria dell'Università di Firenze, per conto della Regione Toscana, nell'ambito di un lavoro più ampio finalizzato allo svolgimento di studi e all'individuazione di procedure per la regionalizzazione delle portate di piena nel territorio toscano (Regione Toscana, 1998).

Il modello si basa sulla trasformazione afflussi-deflussi ottenuta tramite la teoria dell'*Idrogramma Istantaneo Unitario* o *IUH*. I parametri dell'*IUH* possono essere determinati in base alle caratteristiche geomorfologiche del bacino (in particolare la struttura del reticolo idrografico ordinato) ottenendo un cosiddetto *idrogramma unitario geomorfologico* o *GIUH*.

La depurazione dell'afflusso lordo a pioggia netta è basata sulla stima dei due parametri relativi alle perdite iniziali e alle perdite per infiltrazione. La perdita iniziale è schematizzata introducendo un volume unitario per unità di area *Ia* che assorbe completamente la precipitazione durante i primi momenti dell'evento, mentre la perdita durante l'evento viene schematizzata con una con un coefficiente di infiltrazione costante a saturazione *Ks*.

La forzante data dall'evento meteorico è schematizzata attraverso uno ietogramma sintetico la cui frequenza viene stimata a partire dalle curve di possibilità pluviometrica ricavate con l'adattamento della distribuzione *TCEV* (*Two Components Extreme Value*). Il modello, come si è detto, è strutturato in modo tale da ricercare, per un dato tempo di ritorno, il valore critico della durata di pioggia che massimizza la portata di piena. La struttura di dettaglio del modello, insieme ad una breve descrizione dei dati utilizzati, è riportata di seguito.

I dati idrologici, idrometrici e territoriali raccolti ed elaborati per la messa a punto del modello *ALTO* comprendono gli archivi cartacei e informatici del Servizio Idrografico e Mareografico, la documentazione disponibile presso la Regione Toscana, i dati rilevati presso gli Uffici del Genio Civile. Tutti i dati raccolti sono stati archiviati in una base-dati su supporto informatico e su tabulati cartacei e, insieme ad una relazione tecnica sulla validazione e consistenza dell'archivio sono ora a disposizione della Regione Toscana.

In particolare, i dati pluviometrici si riferiscono alle precipitazioni massime annue con durata inferiore ad 1 ora; tra 1 e 24 ore, tra 1 e 5 giorni, le precipitazioni giornaliere, le precipitazioni ad alta risoluzione (serie disponibili ed eventi significativi utilizzati per le fasi di taratura del modello). Le principali elaborazioni relative alla pluviometria hanno riguardato: l'analisi per l'applicazione della distribuzione a doppia componente *TCEV* la stima delle curve di possibilità pluviometrica (annuali e stagionali) sia con distribuzione di Gumbel che mediante la *TCEV* regionale al primo livello per durate inferiori e superiori all'ora; l'analisi della distribuzione spazio-temporale delle precipitazioni in eventi reali e delle piogge giornaliere.

I dati *idrometrici* raccolti sono relativi alle portate al colmo, agli idrogrammi di piena in termini di portate per alcuni eventi in cui erano disponibili anche le precipitazioni ad alta risoluzione, agli idrogrammi di piena in termini di livelli idrometrici delle tre piene più significative per le stazioni idrometriche del Servizio Idrografico di Pisa.

Si sono raccolte le portate massime annuali al colmo, registrate nelle 72 stazioni del Servizio Idrografico interne ed esterne alla Regione Toscana, per tutti gli anni disponibili. Inoltre per alcune stazioni di cui erano disponibili le precipitazioni ad alta risoluzione temporale sono stati acquisiti gli idrogrammi di portata significativi. Tali idrogrammi in parte derivano dall'archivio informatico del Servizio Idrografico e Mareografico e in parte sono stati acquisiti dagli Annali Idrologici, Parte seconda, per digitalizzazione dei diagrammi riportati nella sezione dedicata alla monografia dei principali eventi di piena verificatisi durante l'anno. Sono stati inoltre, acquisiti i livelli al colmo e alcuni idrogrammi di piena significativi in alcune sezioni per cui è previsto il servizio di piena dagli Uffici del Genio Civile della Toscana di Arezzo, Firenze, Grosseto e Lucca.

Le principali elaborazioni relative all'idrometria hanno riguardato l'adattamento della distribuzione di Gumbel alle singole serie storiche di portata al colmo, l'adattamento della distribuzione TCEV al primo livello in sei zone del territorio regionale (Magra, Serchio, Appennino, Chianti, Costa, Maremma), l'analisi statistica di alcune serie storiche di livello idrometrico, l'analisi degli idrogrammi di piena acquisiti;

Il reticolo idrografico è stato digitalizzato dalla cartografia scala 1:25.000. Le aree pianeggianti e di bonifica, scolanti mediante sistemi di drenaggio tipo *acque basse*, sono state separate dal reticolo idrografico naturale in quanto non assoggettabili alle procedure di regionalizzazione previste per le *acque alte*. Tali aree sono state individuate sulla base dei comprensori di bonifica esistenti nonché mediante analisi morfologica dei sistemi drenanti e degli elementi arginali di delimitazione.

Il reticolo idrografico costituisce la base informativa della procedura di regionalizzazione che prevede, per ciascun asta del reticolo, la caratterizzazione del bacino a monte e la valutazione della portata al colmo per i diversi tempi di ritorno. A tal fine il reticolo è stato gerarchizzato secondo Strahler e sono stati ricavati i principali parametri geomorfologici (Petrucci, Preti, Valanzano et al., 1996).

Sono state acquisite le curve di livello in forma vettoriale prodotte dalla Regione Toscana a partire dalla cartografia scala 1:5.000 e i punti quotati utilizzati per la redazione delle ortofotocarte. Inoltre è stato acquisito il modello digitale del terreno *pixel* 400x400m della Regione Toscana, l'uso del suolo 400x400m, i limiti di bacino del progetto regionale IFT93 (Inventario Forestale Toscano) e la carta geolitologica scala 1:250.000 in formato vettoriale. Il modello digitale del terreno e lo strato informativo dell'uso del suolo sono stati acquisiti tramite il modulo GRID ARC/INFO™. Dalla carta geolitologica in forma vettoriale si è ricavato, sempre con lo stesso modulo GRID, un modello matriciale con passo pari a 400 metri. Sulla base del modello digitale del terreno sono state elaborate la carta delle pendenze e la carta delle esposizioni.

Le stazioni di misura delle precipitazioni con strumento registratore hanno una densità media di circa 1 stazione ogni 75 kmq; la risoluzione spaziale è pertanto dell'ordine di 8.5 Km. La densità sale a circa 1 stazione ogni 40 kmq se si considerano anche le stazioni con pluviometro semplice.

L'uso del suolo e le caratteristiche litologiche dei suoli sono state acquisite con una risoluzione di 400 m da dati in scala 1:250000. Il modello di piena adottato è stato tarato su una serie di 66 eventi significativi relativi a 16 bacini della Toscana per i quali sono stati acquisiti o elaborati gli idrogrammi delle piogge ragguagliate e le relative portate defluenti.

Il modello di trasferimento adottato è quello dell'idrogramma unitario di tipo $\Gamma(n, k)$ introdotto da Nash (1959) e caratterizzato dal parametro di forma n e da quello di scala k .

La taratura del modello è stata condotta in modalità automatica utilizzando un algoritmo di minimizzazione dello scarto fra le portate calcolate e quelle registrate, basato sul metodo del semplice (Castelli, 1985).

I parametri tarati per ciascun evento risultano quindi i seguenti:

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

In particolare, dai risultati ottenuti, emergono le seguenti considerazioni:

- i valori del parametro I_a risultano compresi tra 10 mm e 30 mm, in accordo con quanto previsto, ad esempio, dal modello del *Curve Number* che stima la perdita iniziale nel 20% della capacità di assorbimento del suolo (cfr. Busoni et al., 1995);
- i valori del parametro K_s , velocità di infiltrazione a saturazione, sono nella maggior parte dei casi inferiori ad 1 mm/h e possono raggiungere valori di 3.5 mm/h;
- i parametri n e k presentano una certa variabilità, mentre il loro prodotto risulta assai più stabile, al variare dell'evento, per un dato bacino.

Nel seguito si fa cenno alle procedure di regionalizzazione. Per quanto attiene alle precipitazioni si fa riferimento a uno idrogramma sintetico la cui frequenza viene stimata a partire dalle curve di possibilità climatica ricavate con l'adattamento della *TCEV*.

Il codice si basa su un approccio di tipo indiretto-morfologico in grado di schematizzare le principali dinamiche idrologiche del bacino idrografico utilizzando il reticolo idrografico e, sulla base di idonee procedure di regionalizzazione delle informazioni idrologiche e territoriali, consente le seguenti operazioni:

- calcolo delle caratteristiche geomorfologiche e territoriali del bacino considerato;
- calcolo dei parametri della trasformazione afflussi-deflussi;
- valutazione della precipitazione sul bacino;
- calcolo dell'idrogramma di piena per vari tempi di ritorno.

Per quanto riguarda il coefficiente di ragguglio areale K_r si è fatto riferimento, in accordo con quanto riportato in Settesoldi et al. (1996) ad un'espressione del tipo seguente (Eagleson, 1970):

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

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

L'introduzione della dipendenza del parametro α dal coefficiente a della curva di possibilità pluviometrica (nella formulazione originaria α era pari a 1.1, mentre nel presente caso varia da 0.7 a 1.2 al variare di a) e quindi dalle caratteristiche delle precipitazioni è in accordo con Eagleson (1970). Il parametro β rimane invariato, mentre il parametro γ è stato stimato pari a 0.01 anziché 0.004 rispetto alla formula classica. Tali adattamenti sono stati ottenuti sulla base di un confronto fra l'andamento del fattore di riduzione areale così stimato e quelli ricavabili dall'analisi condotta della correlazione spaziale dei dati

pluviometrici o dedotti da note formule tecniche (Puppini, Columbo), nonché sulla base delle verifiche dei risultati del modello *ALTO* descritte nel seguito.

Sulla base dei risultati della taratura del modello afflussi-deflussi descritta nel capitolo precedente si è proceduto alla regionalizzazione dei parametri dell'*IUH* di Nash, a partire dallo studio del prodotto nk che rappresenta la media dell'idrogramma di Nash ovvero il tempo di ritardo del bacino idrografico (T_I). È noto che il tempo di ritardo idrologico in un bacino rappresenta la distanza temporale tra il baricentro dell'idrogramma di piena, depurato della portata di base che sarebbe defluita nel corso d'acqua anche in assenza dell'evento, e quello del pluviogramma netto. Si definisce T_I *caratteristico* di un bacino idrografico il valore medio dei tempi di ritardo relativi, per ogni bacino, ad eventi di piena osservati con periodo di ritorno superiore a 20 anni (Copertino e Fiorentino, 1992). Risultano interessanti, ai fini di ottenerne una regionalizzazione, le espressioni, ricavate da vari autori (Ferrari et al., 1992), che legano il tempo di ritardo alle caratteristiche del bacino e del reticolo idrografico, basate sui parametri geomorfici come i noti rapporti di biforcazione R_b , lunghezza R_l e area R_a . Fattore comune di queste espressioni è la presenza di un parametro cinematico da tarare, la cui determinazione è ancora oggi oggetto di approfondimento scientifico (Copertino e Fiorentino, 1992).

Considerando, nel caso della Toscana, i dati elaborati per i 42 bacini strumentati dal Servizio Idrografico, la migliore relazione fra i valori di T_I derivati dalla taratura del modello sopra descritto ed i parametri geomorfici, si è ottenuta con la formulazione

$$T_I = 0.42 \left(\frac{R_b}{R_a} \right)^{0.3} R_l^{-0.41} \frac{Lmc}{A^{0.075}}$$

dove A è l'area del bacino espressa in km^2 e Lmc la lunghezza del reticolo, in km calcolata come cumulata delle lunghezze medie per i vari ordini gerarchici in accordo con Agnese et Al. (1988).

L'equazione ancora vista, caratterizzata da coefficiente di regressione pari a 0.9, fornisce una maggiore varianza spiegata rispetto alla analoga nota espressione di Rosso, (1982 e 1983). Inoltre, a differenza di una semplice relazione lineare di T_I con un unico parametro geomorfico legato alla dimensione del bacino idrografico, essa consente una migliore regionalizzazione dei parametri del *GIUH* necessaria per l'implementazione del modello di piena.

Tale espressione del tempo di ritardo, ricavata solo con procedimenti di regressione, risulta di un certo interesse in quanto sembra tenere conto, in modo semplice, oltre che dell'effetto del reticolo idrografico sul trasferimento del deflusso secondo la teoria di Rodriguez-Iturbe e Valdes (1979), anche dell'effetto dell'alveo sullo smaltimento della piena, come viene mostrato in uno studio di approfondimento sull'argomento (Preti, 1996) basandosi sulla teoria del regime e precedenti indagini regionali (White, Paris et al., 1981; Canuti e Moisello, 1980).

I parametri I_a e K_s ottenuti dalle tarature del modello sono stati regionalizzati, come già accennato, in funzione dell'uso del suolo e dalla geologia dei bacini, resi indipendenti dalle dimensioni del bacino idrografico. La regionalizzazione di K_s sulla base dell'analisi di 22 classi della carta geolitologica (scala 1:250.000) a cui sono stati attribuiti i valori di permeabilità a saturazione corrispondenti, sviluppando studi precedenti (Caporali e Petrucci, 1992; Mazzanti, 1993) e una metodologia basata sui nuovi dati elaborati in questo studio. In Figura 3 si riportano a confronto i valori di K_s stimati dalla taratura del

modello e quelli ricavati rispettivamente con i valori massimo e minimo dei K_s stimati per ciascun bacino.

Per quanto riguarda il parametro I_a , esso è stato correlato alla percentuale di superficie boscata del bacino idrografico. In Fig. 4 si riportano i valori della taratura e quelli della regressione adottata. Si può osservare l'elevata variabilità del parametro I_a solo parzialmente spiegata dalla regressione, che, peraltro, può essere ritenuta sufficiente per gli scopi dello studio in questione. In realtà, disponendo di maggiori informazioni, potrebbero essere tentati degli approfondimenti circa gli effetti sui fenomeni di intercettazione indotti dall'interazione fra uso del suolo e litologia in mancanza, peraltro, di estese indagini pedologiche.

È noto come l'incertezza nella valutazione delle funzioni di probabilità delle portate al colmo mediante i metodi indiretti di stima dipenda, oltre che dalla schematizzazione delle condizioni di umidità del suolo e della variabilità spazio-temporale delle precipitazioni, anche da distorsioni derivanti da alcune incongruenze teoriche della metodologia dell'evento critico (Bacchi et al., 1993). In tale ottica sono state condotte varie verifiche che, nell'ambito dei limiti dello studio, permettono di valutare il grado di affidabilità dei risultati ottenuti e la robustezza del modello.

A tale scopo sono stati effettuati confronti fra le distribuzioni di probabilità dei colmi di piena derivate dall'analisi statistica e quelle generate dal modello. Ulteriori verifiche sono state condotte comparando alcuni idrogrammi di piena calcolati e registrati, analizzando i dati idrometrici del Genio Civile, e confrontando i risultati del modello con le curve inviluppo. È stata infine condotta un'analisi di sensitività volta a quantificare l'importanza dei parametri del modello sui valori di portata.

La prima verifica dei risultati ottenuti con il modello di piena ALTO è consistita nel confronto fra le funzioni di distribuzione delle portate al colmo calcolate con quelle derivate dalle procedure di inferenza statistica sulle serie di dati delle stazioni idrometriche (in 44 sezioni corrispondenti alle 42 del Servizio Idrografico più 2 sezioni del Genio Civile per cui erano disponibili serie storiche di portate al colmo).

I risultati ottenuti mostrano in generale un soddisfacente accordo con le statistiche puntuali. Risulta interessante osservare l'andamento della distribuzione statistica delle portate fornita dal modello di piena ALTO caratterizzato da una spiccata asimmetria analoga a quella della distribuzione TCEV.

La robustezza del modello è stata confermata dalla verifica effettuata su alcuni bacini non utilizzati nella fase di regionalizzazione dei parametri e validazione. Gli scostamenti maggiori fra i valori delle distribuzioni e quelli del modello sono relativi alle stazioni con serie storiche disponibili limitate (in genere bacini di ridotte dimensioni) e caratterizzate da apparenti anomalie nella serie storica oppure ai bacini in cui sono presenti notevoli capacità di invaso.

La sensitività del modello è stata indagata studiando due bacini campione di aree sensibilmente diverse (Sieve a Fornacina di 863 km² e il Terzolle alle Masse di 13 km²). La valutazione della sensitività si è basata sull'analisi della variazione della portata con tempo di ritorno 100 anni al variare dei seguenti parametri ($\pm 50\%$ rispetto al valore di taratura): perdita iniziale I_a , velocità di infiltrazione K_s e parametri del fattore di riduzione areale α , β e γ .

Si possono trarre alcune osservazioni preliminari. La perdita iniziale, I_a , appare significativa per il bacino di ridotte dimensioni (10% di variazione della portata calcolata) mentre perde di importanza per la valutazione delle piene nei bacini maggiori, il che risulta giustificato

dal fatto che i bacini grandi sono maggiormente cimentati da piogge di lunga durata rispetto alle quali la perdita iniziale risulta trascurabile. Viceversa il parametro di infiltrazione K_s risulta più significativo per il bacino maggiore (15% di variazione della portata calcolata) mentre è praticamente ininfluente per i piccoli bacini ove le intensità di precipitazione degli eventi critici risultano assai maggiori della velocità di infiltrazione. Per quanto riguarda i parametri connessi al fattore di riduzione areale, si ha che essi sono influenti solo per i bacini di grande estensione ove la variabilità spaziale è significativa (fino al 35% di variazione della portata calcolata).

Infine, un'analisi comparativa è stata condotta osservando che i valori del modello, per tempo di ritorno uguale a 100 anni, tendono ad essere inferiori a quelli delle curve iniluppo per bacini fino a 1000 kmq della Toscana (da Bendini, 1969).

Per i problemi idrologici ove sia necessaria la conoscenza della distribuzione dei contributi di piena laterali prodotti dagli affluenti, in funzione di preassegnati eventi meteorici, occorre stimare l'idrogramma di piena per ciascun affluente imponendo una durata di pioggia pari a quella considerata per l'asta principale. La procedura *ALTO* non consente tale applicazione poiché, come già descritto, valuta l'evento critico che, per un determinato tempo di ritorno, massimizza la portata nella sezione considerata del reticolo idrografico.

A tale scopo è stata messa a punto nell'ambito del presente studio una procedura che, utilizzando la base informativa e operativa di *ALTO*, permette il calcolo dei contributi laterali per assegnati valori del tempo di ritorno e della durata di pioggia.

In particolare, per i contributi laterali per i corsi d'acqua non processabili con *ALTO* si assumono gli stessi parametri geomorfici disponibili per i bacini limitrofi. Se non sono disponibili i parametri dei bacini limitrofi si può assumere per N (parametro di Nash) il valore medio di 2.5 (Rossi e Villani, 1994; Bacchi, 1998), e provvedendo alla stima del parametro K tramite la relazione (Bacchi *et Al.* 1989)

$$K = \frac{(N-1)^{N-1} e^{-(n-1)}}{2\Gamma(N)} T_c$$

dove $\Gamma(N)$ è la funzione gamma generalizzata, T_c è il tempo di corrivazione del bacino stimabile con la formula di Giandotti, oppure per via indiretta tramite la stima del tempo di ritardo T_i [ore] in funzione dell'area A espressa in chilometri quadrati Regione Toscana, 1997

$$T_i = 0.32A^{0.5}$$

Tenendo presente la relazione:

$$T_i = nk$$

k , il secondo parametro di Nash può essere ricavato di conseguenza.

Nel caso di aree non urbanizzate di pianura o di bonifica, ove *ALTO* non dispone del reticolo idrografico, si può fare riferimento a risultati sperimentali che conducono a valori indicativi (Bacchi, 1998) dei contributi di piena dell'ordine di 4-6 l/s.ha corrispondenti a tempi di ritorno dell'ordine di 20-30 anni. Tuttavia la necessità di disporre di idrogrammi di

piena e del corrispondente tempo di ritorno, induce a utilizzare un modello di piena analogo a quello impiegato per le aree di collina e di montagna.

In via speditiva si può ricorrere al modello dell'invaso lineare che corrisponde ad un modello di Nash con n pari all'unità, mentre il parametro k può essere stimato dalla relazioni già citate che diventano, per n pari ad uno

$$k = T_r = 0.32A^{0.5}$$

La modellistica idraulica

GENERALITÀ

Il problema della simulazione idraulica dei processi di propagazione della piena in alveo, della tracimazione in quei tronchi ove la capacità di smaltimento risulti insufficiente e della conseguente trasformazione in livelli e velocità sul territorio, è oggetto di un intenso dibattito in ambito tecnico e scientifico. In estrema sintesi si possono individuare due filoni culturali. Il primo si basa sull'uso di modelli indipendenti per la descrizione dell'idraulica dei processi in alveo e sulle aree inondate, connessi da uno schema analitico che descriva il trasferimento dei volumi tracimati. Il secondo filone utilizza un unico schema idraulico per la descrizione del transito delle portate in alveo e, successivamente alla esondazione, sulle aree adiacenti. Nella sostanza si fa riferimento, in quest'ultimo caso, ad una sorta di macroalveo, composto dal letto del corso d'acqua e dalle relative fasce perfluviali nel quale si simula un unico processo di moto stazionario nell'ipotesi che lo schema di corrente monodimensionale sia sostanzialmente conservato.

I due schemi concettuali possono fornire risultati affidabili purché sia correttamente definito il campo di applicabilità. In particolare il primo schema ha una validità più generale in quanto riproduce nel dominio dello spazio e del tempo la dinamica di propagazione e laminazione degli idrogrammi di piena, tenendo conseguentemente conto degli effettivi scambi di massa tra l'alveo e le aree inondate.

Il secondo schema, di tipo stazionario, presenta una innegabile semplicità concettuale e operativa, grazie anche alla disponibilità di strumenti di calcolo collaudati e di ampia diffusione. Resta tuttavia da osservare che, considerata l'inadeguatezza del modello alla descrizione del fenomeno della laminazione, la sua applicabilità è limitata a quei casi in cui non intervengano, o siano comunque trascurabili, gli effetti non stazionari del problema.

Nel caso in esame, salvo situazioni particolari, lo schema adottato è quello non stazionario. La procedura si basa sull'impiego di un codice di calcolo sviluppato *ad hoc* dall'Autorità di Bacino e denominato *Idrarno*. L'utente, ai fini del calcolo, deve disporre dei dati territoriali, geomorfologici e idrologici contenuti nel sistema *ALTO*, e della caratterizzazione geometrica del corso d'acqua e del modello digitale del terreno relativo alle aree inondabili. Tanto il *software* che i dati necessari sono resi disponibili agli utenti sul sito dell'Autorità di Bacino.

Il lavoro ha richiesto, inizialmente, la definizione dell'ambito fisico oggetto di studio che include l'asta considerata e i suoi affluenti. Questa operazione ha consentito, tra l'altro, di individuare le sezioni nelle quali valutare gli idrogrammi di piena attraverso il modulo idrologico di *Idrarno*. Il sistema fluviale considerato, a parità di tempo di ritorno, è stato sollecitato con eventi pluviometrici di durata variabile in modo da individuare le condizioni critiche ai fini dell'estensione delle aree inondabili.

La propagazione degli idrogrammi di piena così derivati è stata simulata attraverso il modulo idraulico di *Idrarno*, basato su di un modello non stazionario appositamente studiato per garantire robustezza e semplicità di applicazione, pur assicurando affidabilità dei risultati e prestazioni confrontabili con modelli analoghi ma di maggiore complessità computazionale.

La simulazione consente la quantificazione dei volumi che si riversano nelle aree potenzialmente inondabili attraverso una adeguata schematizzazione delle connessioni idrauliche tra l'alveo e le fasce perfluviali.

La delimitazione delle effettive aree inondate viene condotta sulla base della schematizzazione morfologica data dal modello digitale del terreno e integrata indispensabili considerazioni relative alla presenza di singolarità sul territorio quali infrastrutture, vie preferenziali di deflusso, caratteristiche del territorio urbanizzato. Su quest'ultimo aspetto vale la pena sottolineare la necessità di una conoscenza diretta del territorio e degli effetti degli eventi storici che lo hanno interessato per una verifica puntuale delle stime ottenute attraverso la simulazione numerica.

Le stesse operazioni, ripetute per i quattro tempi di ritorno prefissati, conducono alla perimetrazione delle aree inondabili e alla redazione delle relative mappe di pericolosità idraulica.

MODELLO QUASI BIDIMENSIONALE DI MOTO VARIO

Lo schema adottato sulle classiche equazioni del moto e di continuità per una corrente monodimensionale, associate a una opportuna equazione per la stima delle dissipazioni energetiche sia a carattere concentrato sia di tipo distribuito. Le equazioni, nella loro formulazione generale di De Saint Venant, esprimono le caratteristiche idrauliche, portata, carico piezometrico, altezza d'acqua e velocità, in funzione del tempo e dello spazio.

La risoluzione dello schema di moto viene ottenuta per via numerica, discretizzando le equazioni nel dominio spazio-temporale mediante opportuni schemi numerici. La soluzione viene pertanto ottenuta solo nei punti di discretizzazione (e non con continuità su tutto il dominio). Tali punti sono rappresentati dalla sezioni geometriche rilevate (*discretizzazione spaziale*) e dalla scansione temporale utilizzata nella rappresentazione dei fenomeni (*discretizzazione temporale*). Il grado di risoluzione che si ottiene deriva quindi dalla densità delle sezioni rilevate e, per lo schema di moto vario, anche dal passo temporale adottato.

Le equazioni di base risultano quindi:

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

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} - J$$

in cui A è l'area della sezione liquida [m^2], Q la portata [m^3/s], $q(x)$ è la portata laterale (positiva se entrante) [m^2/s], H è il carico totale della corrente [m], g è accelerazione di gravità [m/s^2], U è la velocità media della corrente [m/s], J denota le perdite di carico effettivo per unità di lunghezza [-], x è l'ascissa corrente lungo l'alveo [m] e t il tempo [s].

La perdita di carico effettivo può essere stimata con un'equazione analoga a quella adottata per il moto uniforme:

$$J = \frac{U|U|}{gC^2R}$$

ove, oltre ai simboli già noti, R è il raggio idraulico [m] e C il coefficiente di resistenza adimensionale di Chézy esprimibile nella forma

$$C = \frac{K_s R^{1/6}}{\sqrt{g}}$$

ove K_s è il coefficiente di Gauckler-Strickler [$m^{1/3}s^{-1}$].

Per includere nel modello gli effetti dissipativi indotti da variazioni di sezione, quali allargamenti o restringimenti, si sono valutate le perdite di carico effettivo addizionali, ΔH , mediante la formula:

$$\Delta H = \frac{Q^2}{2g} \xi \Delta(\alpha / A^2)$$

ove α è il coefficiente di ragguglio della energia cinetica e ξ è un parametro geometrico che può assumere valori compresi tra 0.1 e 0.8, maggiori nel caso di allargamento della sezione e minori nel caso di restringimento.

La risoluzione delle equazioni sopra descritte viene svolta per alle differenze finite attraverso la definizione di appropriate condizioni al contorno. Lo schema prescelto è di tipo implicito, approssimando alle differenze finite le derivate e operando una media pesata per gli altri termini. In particolare sono state utilizzate le seguenti formulazioni:

$$A = p_s p_t A_i^k + p_s (1 - p_t) A_i^{k+1} + (1 - p_s) p_t A_{i+1}^k + (1 - p_s)(1 - p_t) A_{i+1}^{k+1}$$

$$\frac{\partial A}{\partial s} = p_t \frac{A_{i+1}^k - A_i^k}{\Delta s} + (1 - p_t) \frac{A_{i+1}^{k+1} - A_i^{k+1}}{\Delta s}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = p_s \frac{A_i^{k+1} - A_i^k}{\Delta t} + (1 - p_s) \frac{A_{i+1}^{k+1} - A_{i+1}^k}{\Delta t}$$

dove p_s è il peso della media spaziale e p_t il peso della media temporale. L'indice k è riferito al tempo e l'indice i allo spazio. I valori utilizzati per p_s e p_t sono rispettivamente di 0.5 e 0.45 che dalle prove effettuate risultano essere i più affidabili per la risoluzione del sistema.

Il modello fornisce la risoluzione delle equazioni in corrispondenza dei nodi di una griglia spazio-temporale ove, in corrispondenza delle sezioni fluviali predefinite, al variare del tempo si ricavano i valori delle grandezze idrauliche incognite. A ciascun passo il programma bilancia le equazioni di moto e di continuità in modo iterativo fino al raggiungimento di una correzione su portate e livelli inferiore a una soglia prefissata.

Nell'ipotesi di corrente lenta, le condizioni al contorno da imporre al sistema prima definito possono consistere nella attribuzione di una scala di deflusso nella sezione di chiusura di valle, del tipo:

$$Q = a(h - h_0)^c + q_0$$

dove a , b , c e q_0 sono i parametri della scala di deflusso della sezione considerata, mentre nella sezione di chiusura di monte si ha la definizione dell'idrogramma di portata. Altrimenti può comprendere l'imposizione di un livello o di una portata in funzione del tempo.

Nel caso di condizioni locali di corrente veloce, la profondità viene fissata sul valore critico. In particolare l'equazione di moto a valle della sezione viene sostituita dalla condizione di corrente critica nella sezione in esame.

LA MODELLAZIONE IDRAULICA DELLE AREE INONDABILI

La propagazione dei livelli idrici nelle celle avviene sulla base della conservazione della massa e dunque utilizzando la sola equazione di continuità. A tale scopo è necessario considerare il volume accumulato nella singola cella e le sue variazioni dovute agli scambi di portata con le celle circostanti. Pertanto, ad ogni passo temporale l'equazione di continuità impone il bilancio tra i volumi netti transitati attraverso la cella e la variazione di volume locale, sotto le ipotesi che il volume accumulato in ciascuna cella è univocamente correlato all'altezza idrica nella cella stessa, e le portate scambiate sono funzione dei livelli a monte e a valle delle connessioni idrauliche. In particolare, l'equazione di continuità per la generica area inondabile risulta

$$A_{ck} \frac{\partial h_k}{\partial t} = \sum_i Q_{ki}(h_k, h_i)$$

ove A_{ck} rappresenta la superficie allagata nell'area k -esima [m^2], h_k è l'altezza d'acqua relativa [m], Q_{ki} è la portata scambiata con l'area i -esima adiacente in funzione delle relative altezze idriche [m^3/s].

Il trasferimento dei volumi di esondazione, sia dall'alveo alle celle di accumulo sia tra le stesse celle avviene tramite soglie sfioranti assimilabili a stramazzi in parete grossa, con possibilità di funzionamento bidirezionale, in condizioni di deflusso libero oppure rigurgitato in funzione dei livelli a monte e a valle dello stramazzo. La legge di deflusso adottata è

$$Q_s = l(\mu_1 h_2 + \mu_2 h_1) \sqrt{2gh_1}$$

dove l è la lunghezza della soglia, μ_1 e μ_2 sono i coefficienti di efflusso posti pari rispettivamente a 0.65 e 0.4, h_1 e h_2 sono rispettivamente i livelli del pelo libero a monte e a valle, riferiti alla quota della soglia. Si assume pertanto per gli sfioratori alveo-aree potenzialmente inondabili un funzionamento di stramazzo in parete grossa, anziché di stramazzo laterale.

Per le ipotesi suddette, il fenomeno dell'allagamento di ciascuna area avviene in modo sincrono, cioè non viene messo in conto il tempo effettivo connesso alla reale propagazione sul terreno dei volumi esondati. L'approssimazione adottata è tanto più accettabile quanto maggiore è il numero di celle in cui vengono suddivise le aree complessivamente soggette a esondazione. Infatti, in tal modo, il riempimento di ciascuna cella è regolato dalle caratteristiche degli sfioratori di collegamento tra le celle che, in funzione della quota e della lunghezza, influenzano la velocità di riempimento della cella successiva. Si trascurano comunque gli effetti della non stazionarietà e bidimensionalità connessi al fenomeno di propagazione del fronte di inondazione.

La simulazione del fenomeno di esondazione si basa inoltre sulle ipotesi che i volumi idrici di inondazione si generano esclusivamente per tracimazione delle sommità arginali del corso d'acqua. Non sono dunque considerati altri fenomeni quali, ad esempio, il collasso

delle strutture arginali o fenomeni di rigurgito diversi da quelli già considerati nel presente studio. Le aree suscettibili di inondazione sono inoltre preventivamente delimitabili sulla base delle caratteristiche morfologiche e infrastrutturali del territorio. Si ha così la definizione di *aree potenzialmente inondabili* ottenuta attraverso la fotointerpretazione di immagini alla massima scala disponibile, sull'analisi delle sezioni fluviali e della cartografia disponibile.

Si assume inoltre che il fenomeno dell'allagamento di ciascuna area avvenga in modo sincrono, con legge di riempimento del tipo

$$V = a (H-H_0)^b$$

ove V è il volume di riempimento [m^3], H è il livello idrico, mentre i parametri a , b e H_0 possono essere calcolati in base alle caratteristiche morfologiche dell'area. Si trascurano in questo modo gli effetti della non stazionarietà e bidimensionalità connessi al fenomeno di propagazione del fronte di inondazione. Gli elementi infrastrutturali delimitanti le aree di potenziale inondazione, quali rilevati stradali o ferroviari, si considerano, al pari degli argini fluviali, trascinabili senza collasso.

Tabella 19 - Estensione delle fasce inondabili per i diversi tempi di ritorno [1,2]

Bacino/ Corso d'acqua	Lunghezza asta fluviale (km)	Totale aree inondabili (kmq)	Superfici delle fasce inondabili (kmq) per assegnati tempi di ritorno (anni)			
			30	30 - 100	100-200	200-500
F.Ombrone P.se	24	110	18	41	30	21
F. Bisenzio	40	19	3	7	5	4
F. Greve	39	9.9	3.1	1.5	2.3	3.0
F. Pesa	40	23.6	2.9	7.6	5.9	7.2
F. Sieve	48	17.8	7.7	3.0	3.6	3.5
F. Elsa	23	20.4	4.2	3.1	5.4	7.7
F. Era	15	22.8	7.6	4.8	6.1	4.3
F. Arno	260	370	114	141	64	51
TOTALE	506	593	161	209	122	102

Analisi dei battenti idrici

DEFINIZIONE DELL'AREA DI STUDIO

L'indagine sui battenti è stata condotta per le aree inondate con tempo di ritorno eguale o inferiore a 100 anni. In una prima fase è stato definito l'ambito spaziale di riferimento all'interno del quale sono state svolte le successive elaborazioni. Tale ambito, di seguito indicato come *area di studio*, è esternamente delimitato da un perimetro approssimativamente coincidente con il limite della fascia di inondazione con tempo di ritorno pari a 500 anni ed esteso al corso principale del fiume Arno e dei suoi affluenti per i quali sono disponibili gli studi analitici delle aree di inondazione.

L'area di studio comprende pertanto le aree in cui sono disponibili informazioni ricavate con modellazione matematica. Si è ritenuto opportuno integrare le informazioni ottenute per via analitica con le informazioni storico-inventariali, soprattutto per zone quali la confluenza di corsi d'acqua non studiati o l'intersezione con il reticolo minore.

Individuazione delle zone di accumulo e delle zone di trasferimento

Sulla base di risultati più sopra citati, sono state distinte quelle aree ove le condizioni di allagamento sono prevalentemente attribuibili ai fenomeni di trasferimento dei volumi esondati dette, appunto, *aree di trasferimento*, da quelle soggette a condizioni di allagamento che permangono sul territorio per tempi lunghi rispetto alla durata dell'evento alluvionale dette *aree di invaso statico o di accumulo*. Per queste ultime sono state ulteriormente distinte le aree con battenti idrici di allagamento inferiori a 30 cm da quelle con battenti idrici superiori.

Tale operazione è stata condotta utilizzando la Cartografia Tecnica Regionale scala 1:5000 in associazione alle informazioni desumibili dal modello digitale del terreno dell'Autorità di Bacino con maglia 25 metri. Ove siano state rilevate discrepanze tra il *DTM* e la cartografia, sono stati ritenuti attendibili i dati cartografici.

In tal modo sono state delimitate le due sottofasce di aree destinate a invaso statico, a loro volta mappate in funzione dei battenti idrici, e di aree destinate a prevalente funzione di trasferimento dei volumi esondati.

Pertanto, all'interno di ciascuna delle due fasce di aree inondabili relative ai tempi di ritorno 30 e 100 anni, sono state individuate le seguenti tre sottofasce:

1. aree soggette a prevalenti *fenomeni di trasferimento*, per le quali cioè i volumi esondati dal corso d'acqua transitano senza produrre significativi accumuli idrici che permangono per tempi superiori alla durata dell'evento;
2. aree soggette a *invaso statico*, per le quali cioè i volumi idrici permangono per tempi maggiori di quelli caratteristici dell'evento di esondazione con battenti idrici inferiori a 30 cm.
3. aree soggette a *invaso statico*, per le quali cioè i volumi idrici permangono per tempi maggiori di quelli caratteristici dell'evento di esondazione con battenti idrici superiori a 30 cm.

Sulla base dei risultati ottenuti in tale fase e attraverso il confronto con le altre informazioni disponibili, sono state inoltre analizzate le zone di raccordo tra le aree a definizione analitica con quelle a definizione storico-inventariale, al fine di rendere congruenti le diverse fasce di pericolosità. I criteri per l'attribuzione del grado di pericolosità è riportato nella tabella che segue. Il simbolo *Tr* denota il tempo di ritorno mentre *h* il battente delle aque di inondazione sul piano di campagna.

Tabella 20: Classificazione della pericolosità idraulica per le aree inondate con tempo di ritorno inferiore o uguale a 100 anni, sulla base dei battenti idrici e dell'eventuale funzione di trasferimento

<i>Tr</i> [anni]	Aree di trasferimento	<i>h</i> < 30 cm	<i>h</i> ≥ 30 cm
<i>Tr</i> ≤ 30	P.I.3	P.I.3	P.I.4
30 < <i>Tr</i> ≤ 100	P.I.2	P.I.2	P.I.3

CRITERI OPERATIVI

Occorre tenere presente che, sia i fenomeni di trasferimento che quelli di accumulo devono essere intesi come condizioni a carattere prevalente di un fenomeno rispetto all'altro, da valutarsi essenzialmente in base alle caratteristiche morfologiche e

infrastrutturali del territorio. Più specificatamente, le fasi operative delle elaborazione per la mappatura della pericolosità idraulica sono state le seguenti:

1. Le indicazioni degli studi precedenti citati, riferite alla cartografia CTR 1:10.000 sono state riportate e omogeneizzate su base cartografica di maggior dettaglio in scala 1:5.000. Tale operazione consente una più precisa elaborazione nella identificazione delle diverse zone interne alla fasce relative ai tempi di ritorno 30 e 100 anni. In particolare, la disponibilità di una maggiore densità di punti quotati sul terreno permette un più agevole e corretto tracciamento dei perimetri delle diverse zone di interesse;
2. in funzione delle quote idriche raggiunte nelle aree di potenziale inondazione in corrispondenza degli eventi con tempo di ritorno 30 e 100 anni, sono state dapprima individuate, mediante l'uso del *DTM*, le aree di invaso statico allocando, in base alle morfologia del territorio definita dal modello digitale del terreno, i volumi di inondazione desumibili dal modello idraulico delle aree di potenziale inondazione. Le aree così definite rappresentano pertanto, su base esclusivamente morfologica, le zone ove appare ragionevole ritenere che si accumulino, per tempi significativamente superiori a quelli caratteristici dell'evento, i volumi provenienti dalle sezioni di tracimazione del corso d'acqua;
3. le perimetrazioni delle zone di accumulo ottenute nella fase precedente sono state oggetto di ulteriore affinamento mediante il confronto con i punti quotati disponibili sulla cartografia 1:5000. Ciò si è reso necessario sia per un generale controllo dell'affidabilità del *DTM*, sia per apportare le necessarie correzioni alla rappresentazione digitale del territorio che, in particolari condizioni quali la presenza di rilevati, infrastrutture viarie, arginature, può non risultare sufficientemente significativa;
4. all'interno di tale perimetrazione, e con la stessa metodologia prima descritta, sono state distinte le due sottofasce comprendenti rispettivamente aree con battenti idrici inferiori a 30 cm e aree con battenti idrici superiori;
5. le rimanenti aree, comprese tra la perimetrazione delle zone di accumulo e la delimitazione originale delle aree inondabili, sono state considerate aree soggette a prevalente fenomeno di trasferimento, per le quali cioè i volumi tracimati dal corso d'acqua transitano o comunque permangono per tempi confrontabili con quelli caratteristici dell'evento. Da notare che possono ricadere in tale categoria zone anche non direttamente connesse, o comunque prossime, al corso d'acqua considerato che tuttavia possono ancora ritenersi zone di trasferimento grazie alla presenza di un reticolo di drenaggio minore verso il quale possono convogliarsi le acque di inondazione.

L'applicazione della metodologia sopra esposta deve essere applicata un insieme di informazioni vasto, caratterizzato da disomogeneità significative nella qualità e quantità dei dati. Richiede dunque la individuazione di criteri che permettano di inquadrare i diversi livelli informativi in un sistema unitario che ne consenta un utilizzo basato essenzialmente su requisiti di omogeneità, riproducibilità e aggiornabilità.

A tal fine è stato definito un riferimento spaziale individuando, come già richiamato, il perimetro dell'area di studio coincidente approssimativamente con il limite della fascia di inondazione con tempo di ritorno pari a 500 anni ed esteso al corso principale del fiume Arno e dei suoi affluenti per i quali sono disponibili gli studi analitici delle aree di inondazione.

Tale area comprende tutte le aree inondabili determinate per via analitica, nonché quelle zone, soprattutto in corrispondenza di affluenti non studiati, ove si è ritenuto necessario procedere al raccordo con le aree di inondazione di tipo storico-inventariale. Al di fuori dell'area di studio, ove non è disponibile alcuna informazione su base analitica, vengono utilizzate le informazioni disponibili contenute nei dati di tipo storico-inventariale. Con la progressiva estensione degli studi analitici al resto del territorio, l'area di studio viene conseguentemente modificata e aggiornata sulla base degli stessi criteri sopra descritti.

Come già accennato, oltre alle informazioni relative alle aree definite su base analitica, sono stati considerati tutti quei casi di "raccordo" con le informazioni provenienti dai dati storico-inventariali per i quali si è ritenuto significativo procedere alla integrazione tra le due fonti informative. Ciò al fine di rendere coerente la mappatura della pericolosità idraulica per quelle zone poste in adiacenza all'area di studio e per le quali la sola informazione analitica non risulta sufficiente a fornire un quadro esauriente dei fenomeni di inondazione. È il caso di zone in prossimità di affluenti non studiati, di zone con evidenti fenomeni di ristagno, di zone con reticolo di drenaggio posto a tergo di corsi d'acqua arginati.

All'interno dell'area di studio prima definita, nelle zone ove si verificano sovrapposizioni tra aree analitiche e aree storico-inventariali, sono stati adottati i seguenti criteri:

1. per le zone di sovrapposizione ove risulta significativa dal punto di vista idraulico-morfologico la mappatura su base analitica, si assume valida esclusivamente quest'ultima ai fini della classificazione della pericolosità idraulica;
2. per le zone di sovrapposizione ove viceversa l'informazione analitica è parziale, ad esempio in corrispondenza di confluenze tra asta principale e un corso d'acqua non studiato, si procede ad un raccordo tra aree analitiche e aree storico-inventariali sulla base dei dati disponibili, attribuendo all'area così raccordata la classe di pericolosità più cautelativa;
3. per le aree poste al margine esterno dell'area di studio, è stata garantita, per quanto possibile, la continuità dei livelli di pericolosità tra l'interno e l'esterno; eventuali discontinuità sono normalmente da attribuirsi alla presenza di rilevati stradali o ferroviari; i casi in cui tali infrastrutture non ci sono ma si evidenzia comunque la presenza di un grado di pericolosità più elevato fuori dall'area di studio rispetto all'interno, sono tipici degli affluenti secondari (o delle reti di drenaggio minori, come nel caso di Ponsacco in sinistra del Fiume Cascina), che fino ad ora sono stati esclusi dallo studio analitico ma che necessitano prioritariamente di studi di approfondimento.
4. per le aree interne all'area di studio, dove lo studio analitico sul reticolo maggiore delle acque alte può non essere esauriente (ad esempio per la presenza di reti di acque basse o dei tronchi finali di affluenti secondari), l'informazione di tipo storico-inventariale è stata sovrapposta a quella analitica ed ha prevalso su di essa in tutte le situazioni in cui si è ritenuto l'inondazione fosse dovuta a parti di reticolo non studiate analiticamente.

La riproducibilità della metodologia adottata viene garantita dalla conservazione di tutti i livelli informativi utilizzati e dalla possibilità di risalire a ciascun livello di origine che ha concorso alla generazione della mappatura finale.

La metodologia di elaborazione sopra descritta è stata applicata alle aree inondabili disponibili per i corsi d'acqua Arno, Sieve, Elsa e Era. Al fine di omogeneizzare i risultati e gli elaborati grafici, sono state incluse nel presente lavoro le elaborazioni fornite

dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno relativamente ai corsi d'acqua Greve, Bisenzio, Ombrone, Pesa, e di alcuni affluenti minori del Casentino, già oggetto di perimetrazione su base analitica in precedenti studi svolti a cura dell'Autorità.

In particolare, le elaborazioni fornite sono state condotte con metodologia analoga a quella utilizzata nel presente studio, includendo nell'analisi i risultati dello studio *Bacini idrografici Torrenti Ombrone P.se e Bisenzio – Riduzione del rischio idraulico – Progettazione preliminare degli interventi* svolto dalla provincia di Prato e Pistoia che, a differenza degli altri citati, contiene maggiori informazioni sulle zone di allagamento per ristagno di acque basse nei bacini dei fiumi Ombrone Pistoiese e Bisenzio.

A questo proposito, conviene richiamare brevemente i criteri adottati dall'Autorità di Bacino per la elaborazione delle aree analitiche contenute nello stesso studio. Nel lavoro, difatti, sono stati valutati, per i tempi di ritorno di 10, 20, 50, 100 e 200 anni, oltre ai volumi di inondazione derivanti dal sistema "acque alte", i volumi idrici relativi ai sistemi "acque basse". Tali volumi sono stati distribuiti sul territorio assumendo nulla la portata verso il ricevente, perimetrando in tal modo aree soggette a esclusivi, o comunque prevalenti, fenomeni di ristagno.

I fenomeni di ristagno indotti dal sistema "acque basse" appaiono prevalenti rispetto ai fenomeni di esondazione indotti dal sistema "acque alte" per eventi con tempi di ritorno fino a circa 50 anni. Per eventi con tempi di ritorno superiori a 50 anni i volumi di esondazione dal sistema "acque alte" si sovrappongono ai volumi di ristagno del sistema "acque basse";

I risultati evidenziano pertanto una significativa tendenza ai fenomeni di ristagno nei bacini dell'Ombrone e del Bisenzio, che necessitano di essere messi in conto nella perimetrazione delle aree inondabili.

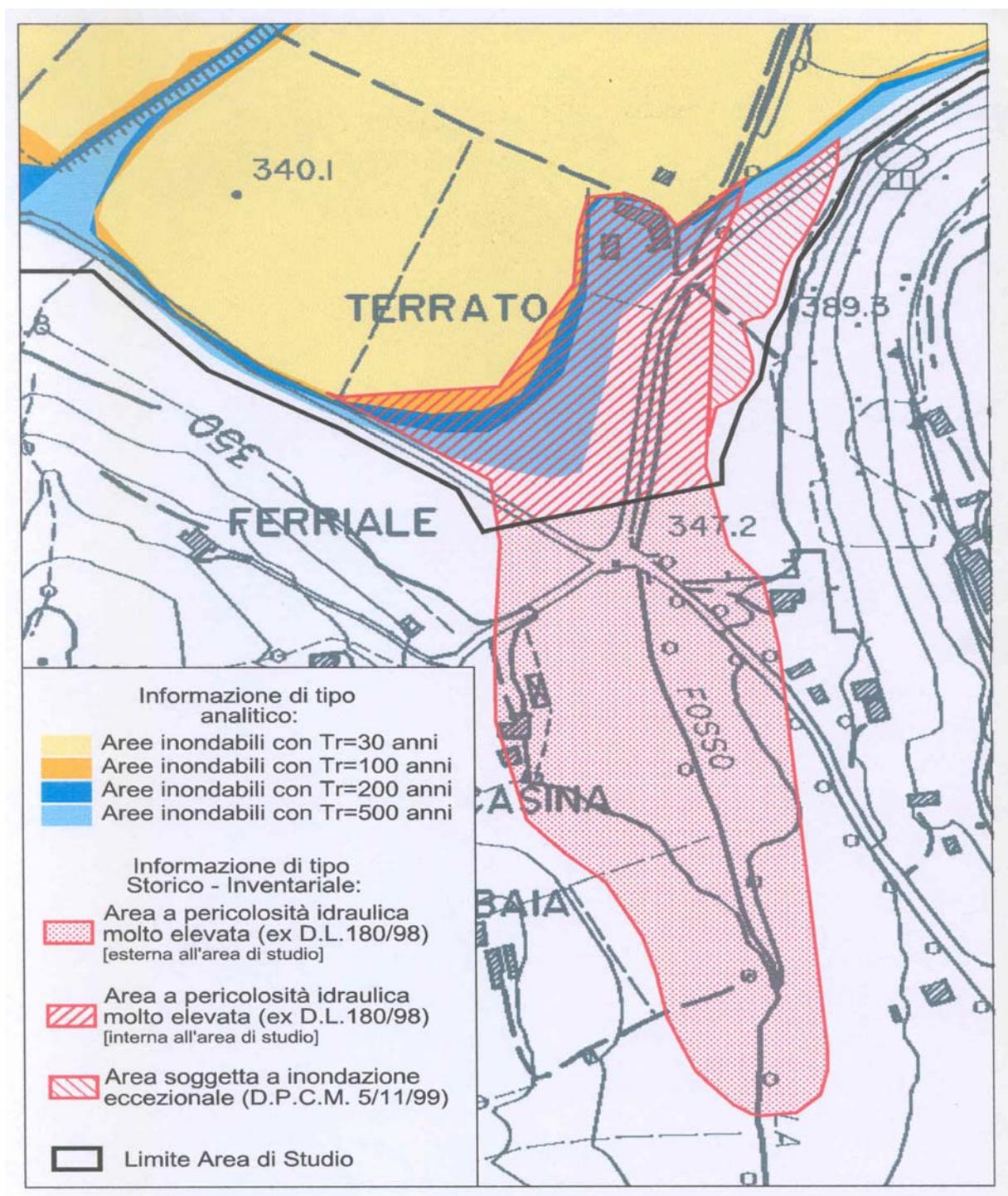


Figura 1.A – Sovrapposizione di informazioni analitiche e storico-inventoriali.

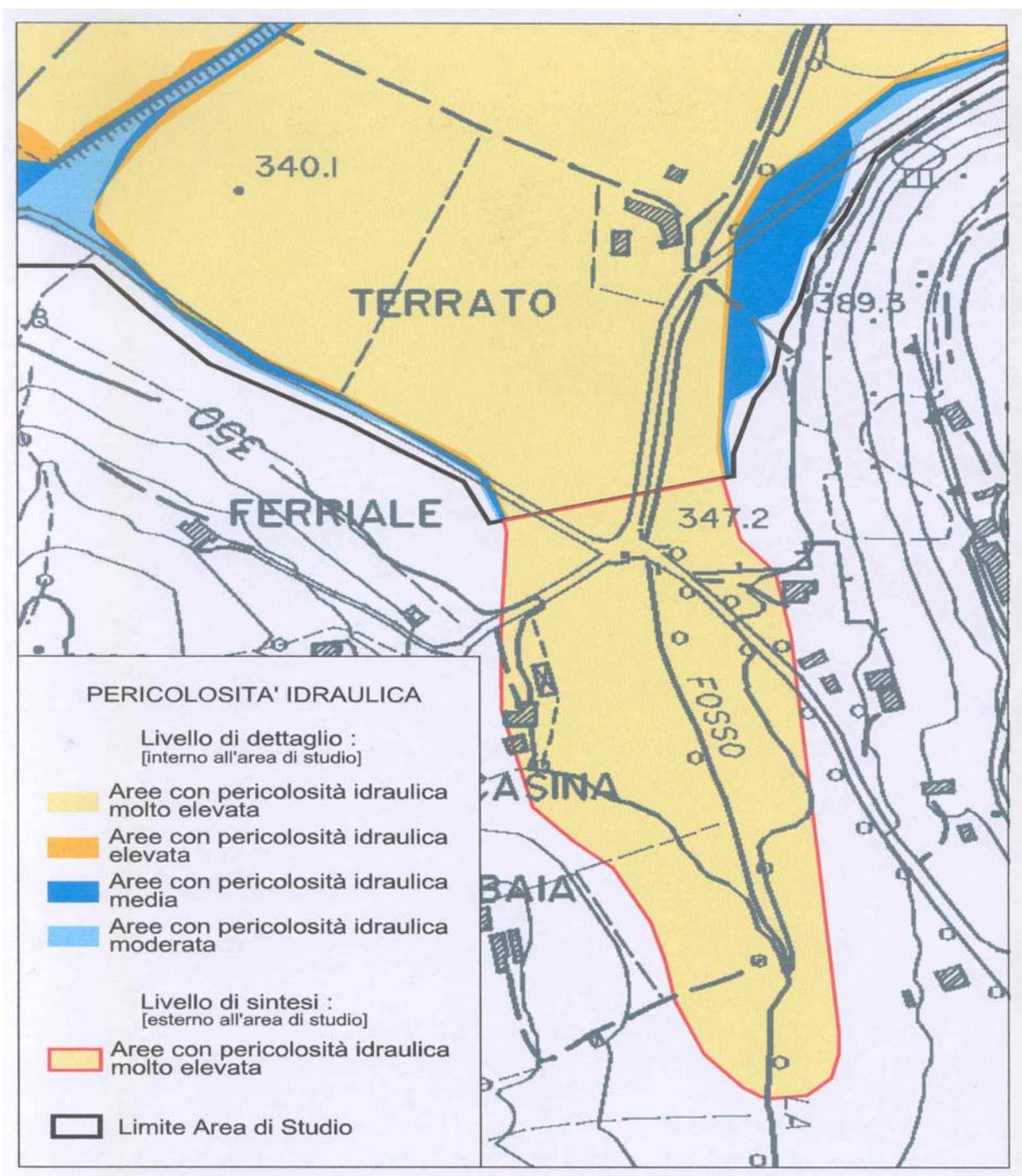


Figura 1.B – Mappatura della pericolosità con acquisizione dell'informazione storico-inventariale.

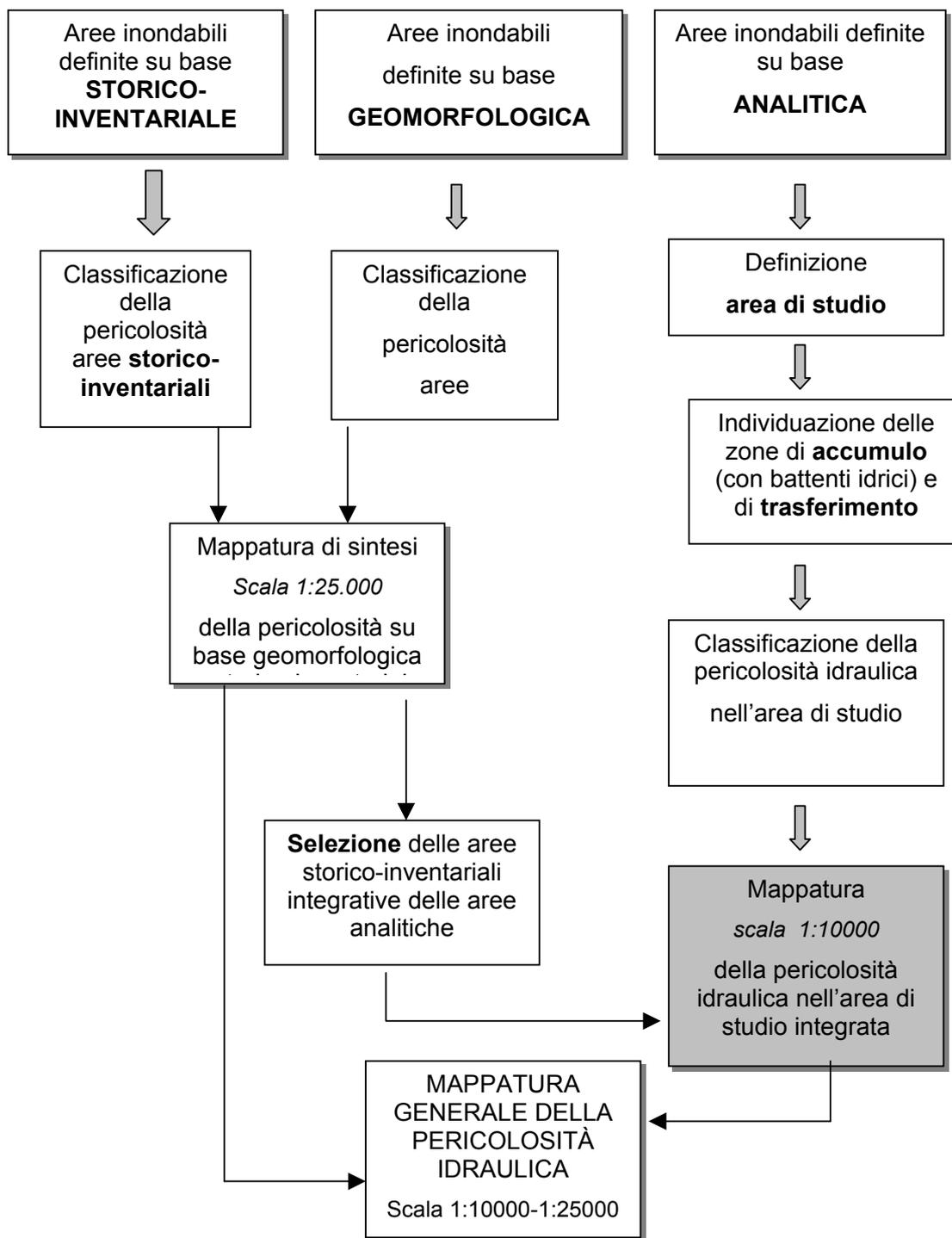


Figura 2 – Schema della metodologia adottata

PERICOLOSITA' DA FRANA

INTRODUZIONE

Nella redazione del *Piano Straordinario* furono perimetrare e poste sotto misura di salvaguardia, le aree interessate da fenomeni franosi noti, attivi o quiescenti, classificati a pericolosità e rischio *molto elevati (R.F.4/P.F.4)*. Tale valutazione fu svolta, tra l'altro, in coerenza con le indicazioni espresse dal *GNDCI*. All'atto della redazione del *PAI* è stato tuttavia necessario individuare delle metodologie di tipo più generale che, in coerenza con lo stato dell'arte della ricerca, permettessero di caratterizzare la propensione al dissesto del territorio ancorché non manifesta.

Viste anche le considerazioni espresse nei precedenti paragrafi, emerge la complessità dell'individuare una metodologia applicabile alla scala dell'intero bacino, considerate anche le caratteristiche del quadro conoscitivo disponibile. Si è dunque ritenuto, anche in questo caso, di optare per una duplice filosofia di perimetrazione, provvedendo ad un indirizzo speditivo per la scala sinottica, al quale progressivamente sovrapporre una serie di approfondimenti su singole tessere del mosaico territoriale.

Il *PAI*, allo stato attuale, presenta dunque l'individuazione e la perimetrazione delle aree a pericolosità di tipo franoso, svolta alla scala generale, pur riportando alla scala di dettaglio l'inventario dei fenomeni noti. Inoltre viene delineata una metodologia, ancora in via di sperimentazione, con la quale procedere, nei successivi aggiornamenti, all'indagine di dettaglio. Una prima applicazione del metodo è comunque presentata, come caso di studio, sul bacino del torrente Virginio.

Tuttavia, per fornire una indicazione a livello generale, sulla propensione al dissesto valutata sulla base dei fattori predisponenti, è presentata una ulteriore applicazione speditiva estesa all'intero bacino. Questa riprende i concetti principali espressi nella metodologia *ENEA Minamb*.

IL LIVELLO DI SINTESI

Le carte di pericolosità geomorfologica alla scala di sintesi sono state dunque redatte avvalendosi degli studi già in possesso dell'Autorità, nonché nelle elaborazioni contenute nei *Piani di Coordinamento Provinciali (PTC)*, peraltro in conformità a quanto previsto nel *DPCM 29/09/98*, che precisa la necessità di tenere conto degli strumenti di pianificazione di area vasta prevalenti. La scala di lavoro sinottica è 1:25.000.

La pericolosità da dissesto, nella documentazione disponibile, è definita come funzione dei caratteri del dissesto stesso e dei caratteri fisici del contesto territoriale. Tra questi la geologia, la litologia, l'idrogeologia, l'uso del suolo, la geomorfologia, con particolare riferimento alla pendenza dei versanti.

L'ambito spaziale per il quale è stata definita la pericolosità coincide, almeno in generale, con la porzione del bacino idrografico a monte del limite della pianura definito con apposito studio geomorfologico dall'Autorità. In alcuni casi, relativi a frane con livello conoscitivo più approfondito, sono state perimetrare aree di fondovalle soggette a pericolosità indotta dai fenomeni di dissesto presenti sui versanti.

La documentazione utilizzata per la perimetrazione delle aree a pericolosità geomorfologica, come si è detto, è sostanzialmente composta da quella prodotta o disponibile presso l'Autorità di Bacino e quella reperibile presso le province, oltre alla banca dati vettoriale geologica disponibile per il bacino dell'Arno.

Un'ulteriore fonte di informazione ai fini della individuazione e perimetrazione deriva, nella sostanza, dai Piani Territoriali di Coordinamento redatti dalle Province o al relativo quadro conoscitivo appositamente predisposto ove essi non risultassero approvati. Tali strumenti contengono, di norma, la carta geomorfologica sulla quale sono rappresentate le frane e gli altri fenomeni geomorfologici di versante, come le forme di intensa erosione, e la carta della pericolosità idrogeologica. Ove disponibile è stata considerata la carta della pericolosità.

La carta della pericolosità geomorfologica, generalmente, suddivide i versanti in quattro classi di pericolosità, indicate con i termini *elevata*, *media*, *bassa* e *irrilevante*. Il livello del quadro conoscitivo, la scala di lavoro e i contenuti dei diversi *PTC* del Bacino dell'Arno sono piuttosto eterogenei e hanno richiesto un cospicuo lavoro di validazione, integrazione ed omogeneizzazione.

In particolare le cartografie relative alle Province di Arezzo, Firenze, Perugia, Pisa e Pistoia sono state ritenute sostanzialmente rispondenti ai criteri prefissati per la Carta della pericolosità del *PAI* ed hanno richiesto modesti approfondimenti. Per la Provincia di Lucca e di Prato è stata invece necessaria la fotointerpretazione a completamento dell'informazione. La cartografia della Provincia di Livorno e Siena non è stata utilizzata, perché non omogeneizzabile: la pericolosità è stata ottenuta direttamente da fotointerpretazione e da dati di bibliografia.

Sono state effettuate verifiche a campione su tutto il territorio, attraverso tecniche di fotointerpretazione e sopralluoghi, per controllare la qualità complessiva del dato. In particolare è stata svolta una verifica specifica per quanto attiene alle aree presenti nell'inventario dei fenomeni franosi dell'Autorità di Bacino per assicurare, tra l'altro, la compatibilità tra i diversi strati informativi.

Alla scala sinottica sono state individuate tre classi di pericolosità in quanto la più elevata è integralmente riportata alla sola scala di dettaglio. Le classi così caratterizzate:

Classe *P.F.3* a pericolosità *elevata*, comprende le frane già definite a *pericolosità elevata* contenute nell'inventario dei fenomeni franosi dell'Autorità di Bacino, tutte le altre frane attive e non attive rilevate, situazioni geomorfologicamente molto precarie, come calanchi, scarpate rocciose ecc., aree rappresentate nei *PTC* come appartenenti alla IV classe di pericolosità. Si tratta quindi di aree interessate da frane e altri fenomeni di dissesto, attivi o quiescenti, e da condizioni geomorfologiche marcatamente sfavorevoli, causa di rischio reale o potenziale elevato. La superficie totale interessata è di 458.40 kmq pari al 6,4% della superficie totale dei versanti e al 5.1% della superficie totale del bacino.

Classe *P.F.2* a pericolosità *media*, comprende le frane definite a *pericolosità media* contenute nell'inventario dei fenomeni franosi dell'Autorità di Bacino, le aree apparentemente stabili ma interessate da litologia con caratteristiche litotecniche sfavorevoli.

Classe *P.F.1* a pericolosità *bassa*, comprende aree apparentemente stabili, interessate da litologia con interessate da litologia con caratteristiche litotecniche generalmente favorevoli, che talora possono essere causa di rischio reale o potenziale moderato.

Le due classi inferiori di pericolosità, *P.F.1* e *P.F.2* interessano, nel loro insieme, una superficie di 6728 Km², pari al 93,5% della superficie dei versanti e al 73,7% della superficie totale del bacino.

LA METODOLOGIA PER IL LIVELLO DI DETTAGLIO

La cartografia allegata al PAI, per quanto attiene la individuazione e perimetrazione delle aree a pericolosità da dissesto geomorfologico è, in sostanza, la risultanza dei due lavori di inventario e censimento di dettaglio dei dissesti.

Il primo è la banca dati che andrà a confluire nell'*inventario dei fenomeni franosi italiani*, che contiene i punti di massima quota della nicchia di distacco: per 472 frane sono registrati i dati geomorfologici utili alla definizione della classe di pericolosità, ulteriori 464 frane risultano localizzate ma non ne è noto l'effettivo stato di attività.

L'Autorità ha inoltre redatto, attraverso l'integrazione di tale inventario, il *censimento e perimetrazione delle frane a rischio del bacino del fiume Arno* che contiene la caratterizzazione geomorfologica delle aree in frana e la definizione del livello di rischio stabilito attraverso uno studio specifico condotto dalle Università di Siena, Pisa e Firenze sotto la guida del prof. Carmignani. Nello studio sono indicate 40 aree a pericolosità e rischio *molto elevati* (P.F.4/R.F.4), 80 aree a pericolosità e rischio *elevato* (P.F.3/R.F.3), 43 aree a pericolosità e rischio *moderati* (P.F.2/R.F.2). Sulla base di tale documentazione si è sviluppato il *Piano straordinario, diretto a rimuovere le situazioni a rischio idrogeologico più alto* ai sensi della L 226/99.

La cartografia a livello di dettaglio presenta dunque tre livelli di pericolosità così caratterizzati:

Classe *P.F.4*, a pericolosità *molto elevata*, comprende le aree a pericolosità e rischio molto elevato già indicate nel Piano Straordinario. Sostanzialmente sono aree interessate da frane attive, causa di rischio molto elevato. La superficie totale interessata è di 9.87 kmq pari allo 0.14% della superficie totale dei versanti e allo 0.11% della superficie totale del bacino.

Classe *P.F.3* a pericolosità *elevata*, comprende le frane quiescenti o frane attive causa potenziale di rischio *elevato*.

Classe *P.F.2* a pericolosità *media*, comprende le frane quiescenti causa potenziale di rischio medio.

Tale criterio, di ordine prettamente storico-inventariale, ha tuttavia carattere temporaneo e riflette la carenza di dati disponibili sul bacino, sufficienti per una valutazione del rischio basata su tecniche di analisi geografica. Il quadro conoscitivo tuttavia, ad opera di una serie di iniziative avviate dall'Autorità, sta rapidamente evolvendo. Si segnala a tale proposito:

1. la realizzazione di un nuovo inventario dei dissesti alla scala 1:10000 sull'intero territorio del bacino, svolto in collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra di Firenze specificamente finalizzato all'aggiornamento della cartografia da rischio da frana ai fini della pianificazione di bacino;
2. la realizzazione di un modello digitale del terreno con passo 10 metri, basato sulle primitive della CTR, opportunamente elaborato ai fini dei calcoli geomorfologici e idraulici, sviluppato in collaborazione con la Provincia di Siena;
3. l'acquisizione in formato vettoriale degli originali d'autore alla scala 1:25000 che hanno portato alla redazione della seconda serie della Carta Geologica d'Italia, svolta in collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra di Siena. È in corso l'integrazione dello strumento con i primi risultati del rilevamento geologico CARG;

4. aggiornamento della banca dati della copertura del suolo *CORINE – Land cover* secondo le informazioni e il dettaglio del satellite Landsat 7 TM;
5. realizzazione della banca dati degli elementi a rischio, estratta dalle primitive della CTR aggiornata al 2000 e integrata con l'ausilio di foto aeree alla scala 1:2000 ortocorrette.

La metodologia di aggiornamento ed integrazione del livello di dettaglio trae le basi da quella elaborata nell'ambito dell'Accordo di Programma tra Enea e Ministero per l'Ambiente e la tutela del territorio, linea *Il risanamento del territorio, delle aree urbane e delle acque*, illustrato nel dettaglio in precedenti paragrafi, che prevede la stesura di linee guida per la zonazione del rischio da frana. Viene proposto, nella sostanza, un approccio integrato tra rilevamenti geomorfologico, geologico, litotecnico, idrogeologico e di uso del suolo, relativamente a distinte tipologie di frana. Partendo dall'analisi del fenomeno si procede alla valutazione della suscettibilità anche di quelle aree non interessate in passato da dissesti franosi. In tal modo si viene determinata anche la pericolosità associata ai processi di neoformazione.

Si tratta di una valutazione della suscettibilità e può essere intesa come una sintesi fra previsione *spaziale* e previsione *tipologica*. Tale metodologia è applicabile alla scala 1:10.000 e costituisce una fase propedeutica alle successive fasi di valutazione della pericolosità e del rischio.

Il carattere della metodologia è sostanzialmente innovativo e il coordinamento e l'omogeneizzazione dei dati disponibili in un contesto geografico così ampio e variegato, hanno imposto, in questa fase, di individuare un bacino pilota, ragionevolmente rappresentativo della dinamica di versante che caratterizza tutto il restante ambito territoriale di competenza.

Il bacino del Torrente Virginio è stato scelto come bacino pilota sulla base di valutazioni sia di carattere geomorfologico che di disponibilità di dati pregressi indispensabili per la valutazione della suscettibilità da frana. La situazione del Torrente Virginio è infatti, dal punto di vista della dinamica di versante, abbastanza rappresentativa di molti contesti geomorfologici presenti nella porzione inferiore del bacino dell'Arno, che, essendo in gran parte incisa nei termini formazionali terrigeni appartenenti alle Successioni marine neogeniche, presenta un certo livello di omogeneità anche dal punto di vista geologico.

L'area, inoltre, è stata oggetto, nel corso degli ultimi anni, di ricerche svolte presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, per cui presenta una buona copertura per quanto concerne dati digitali di natura geomorfologica e geologica, indispensabili per la messa a punto del modello di valutazione della suscettibilità da frana.

La ricerca si è realizzata nelle seguenti fasi:

1. Acquisizione di dati pregressi di natura geologica, geomorfologica e geotecnica specifici del Bacino del Torrente Virginio;
2. Integrazione dei dati pregressi mediante analisi aerofotogrammetrica e rilevamento di campagna;
3. Applicazione al contesto del Bacino del Torrente Virginio della metodologia per la valutazione della suscettibilità da frana e individuazione di una specifica funzione di suscettibilità.

In estrema sintesi sulla superficie del bacino, pari a 60,3 Km², sono state inventariate e caratterizzate 285 frane, per una superficie pari al 5,7 % del bacino, sulla base di un'area ritenuta significativa è stata quindi eseguita l'*analisi di sito* finalizzata all'individuazione dei

parametri *discriminanti* e *predisponenti* (precedentemente rilevati sull'intero bacino o a livello di sito).

La successiva *analisi di macroarea* ha portato alla verifica e spazializzazione dei suddetti parametri, la valutazione incrociata dei dati spaziali e delle informazioni raccolte nell'analisi di sito a permesso l'applicazione di una funzione di suscettibilità al dissesto, che ha portato alla definizione delle seguenti 4 classi:

1. Suscettibilità alta (S3) Presenza di frane attive o quiescenti o presenza di almeno 3 elementi precursori;
2. Suscettibilità media (S2) Presenza di almeno 1 elemento precursore o concomitanza di almeno 3 parametri predisponenti;
3. Suscettibilità bassa (S1) Presenza di almeno 1 parametro predisponente;
4. Suscettibilità nulla (S0) Assenza di parametri predisponenti e elementi precursori.

I risultati sono presentati in allegato 1 agli elaborati del PAI.

L'INDICIZZAZIONE SUL TERRITORIO DEL BACINO

Nell'ambito dell'elaborazione del PAI, la segreteria tecnica-operativa dell'Autorità di Bacino ha formulato un'ipotesi di lavoro, con l'obiettivo di elaborare una zonazione della pericolosità da frana del bacino alla scala sinottica (non superiore al valore 1:100.000), basata sull'indicizzazione di alcuni parametri predisponenti individuati come fondamentali.

La prima fase del lavoro ha portato all'individuazione dei parametri predisponenti all'instabilità dei versanti nella pendenza, nelle caratteristiche litotecniche delle formazioni geologiche affioranti nel bacino e nell'uso del suolo prevalente. L'attributo indipendente necessario per l'indicizzazione, e quindi per la zonazione, è stato invece individuato nell'insieme dei valori dell'attuale banca dati relativa all'inventario dei fenomeni franosi nel bacino dell'Arno.

Nella valutazione dei limiti e dell'applicabilità del processo ipotizzato è stato messo in evidenza che i parametri pendenza dei versanti, litotecnica e uso del suolo non sono in grado, se analizzati separatamente, di descrivere la distribuzione dei dissesti all'interno del bacino; al contrario, analizzando l'associazione spaziale di questi tre vettori, si ottiene una discriminazione degli elementi territoriali, definibili come Unità Territoriali Omogenee *UTO*, la cui distribuzione risulta, in prima approssimazione, coerente con quella delle aree in dissesto effettivamente rilevate.

Per ovviare alla proliferazione di tipologie diverse di *UTO*, legata al dettaglio delle banche dati utilizzate, è stato necessario effettuare un'analisi della classazione delle singole banche dati geografiche finalizzata all'individuazione degli intervalli o degli insiemi effettivamente significativi. Questo processo si è avvalso sia di esperienze riportate in letteratura sia di opportune analisi statistiche. Si deve comunque tener presente che il processo di classazione è stato in qualche misura soggettivo e ha comportato una notevole approssimazione nella definizione delle classi in cui suddividere i tre temi considerati. Le semplificazioni introdotte non hanno comunque compromesso il fine sperimentale del metodo e la sua impostazione procedurale.

La scelta della metodologia di indicizzazione basata sulla distribuzione e frequenza dei dissesti rispetto alle *UTO*, è stata dettata dalla seguente ipotesi di base: se per una data combinazione di parametri predisponenti, in una ben definita realtà geografica, si registra una certa densità di dissesti, è verosimile che, se i caratteri predisponenti sono realmente tali, si possa verificare una situazione di dissesto anche in altre aree geografiche caratterizzate dalla medesima combinazione di parametri. Si ritiene che tale proprietà transitiva sia valida solo nell'ambito di realtà geografiche in cui i parametri predisponenti

abbiano una variabilità limitata, dove il numero dei dissesti registrati sia sufficientemente ampio e la distribuzione di campionamento sufficientemente omogenea, condizioni che si considerano verificate nel bacino dell'Arno.

Nello schema riportato sotto è esplicitato sinteticamente il flusso metodologico che ha portato alla definizione delle UTO e delle classi di pericolosità relativa basata sui valori di densità dei dissesti corrispondenti ai quartile dell'intervallo.

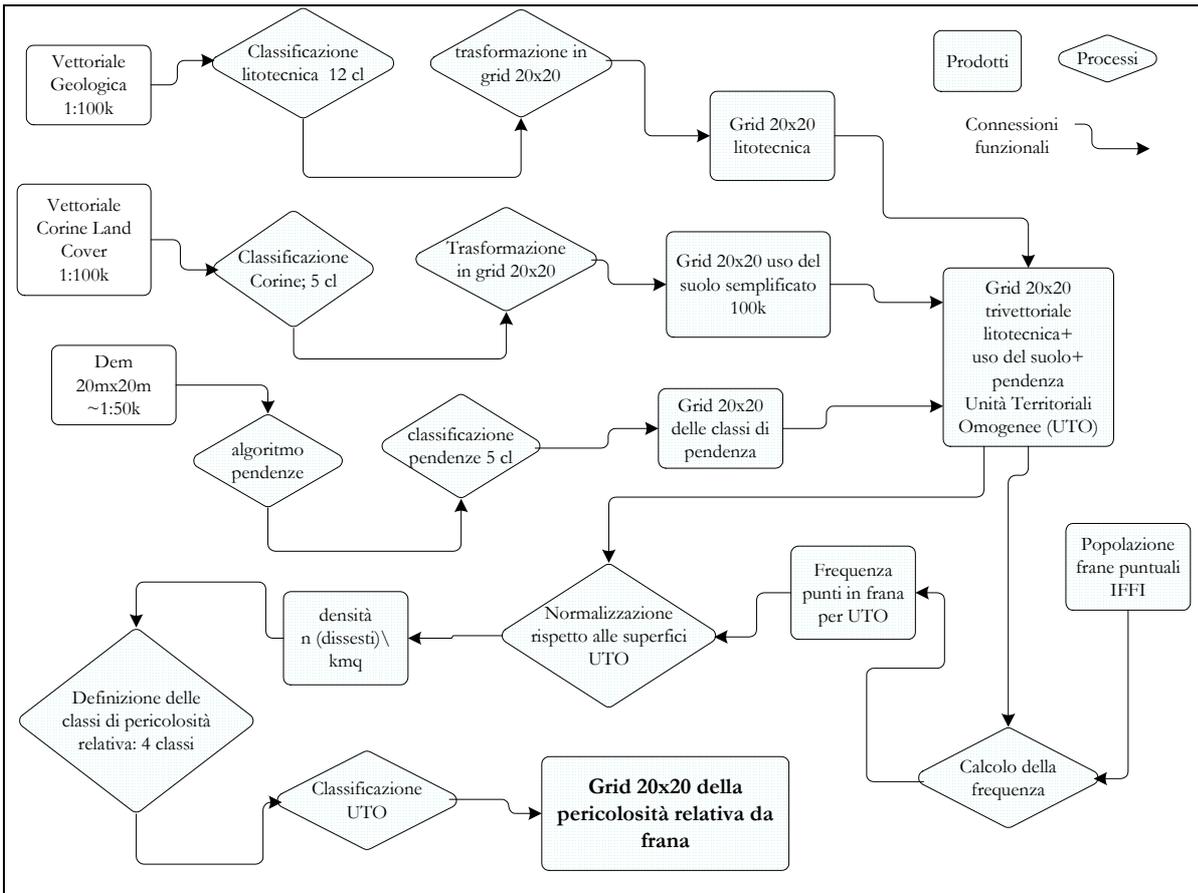


Diagramma di flusso della metodologia per l'indicizzazione dei parametri predisponenti l'instabilità dei versanti

Nel CD-ROM n.6 allegato al PAI sono riportati integralmente i risultati dello studio e i dati geografici relativi.