



Università della
Calabria



Politecnico di Bari



Università degli Studi
della Basilicata



UNIVERSITÀ DEL SALENTO

Università del
Salento

*Dottorato di Ricerca in Ingegneria Idraulica
per l'Ambiente e il Territorio - XX Ciclo*

Settore scientifico-disciplinare ICAR/02

Dissertazione per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca

*Tecnologia laser-scan e modelli idraulici
per la valutazione del rischio di inondazione
nelle pianure costiere*

Luciana Giosa

Coordinatore
Prof. Ing. Paolo Veltri

Tutor
Prof. Ing. Vito Copertino

Prof. Ing. Aurelia Sole

Cosenza, Novembre 2007

INDICE

1. INTRODUZIONE	4
2. LA DELIMITAZIONE DELLE AREE INONDABILI	9
2.1. La definizione di rischio	11
2.2. Il Piano di Bacino	14
2.3. Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)	15
2.4. Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico in Basilicata	16
3. LA MODELLISTICA NUMERICA A SUPPOTO DELLA INDIVIDUAZIONE DELLE AREE INONDABILI	21
3.1. Modelli monodimensionali	21
3.2. Modelli bidimensionali	23
3.3. I codici di calcolo adottati	25
3.3.1. <i>La simulazione monodimensionale con il software Hec-Ras</i>	25
3.3.2. <i>La simulazione bidimensionale con il software FLO-2D</i>	27
3.3.3. <i>La simulazione bidimensionale con il software MIKE 21</i>	28
4. L'AREA DI STUDIO	32
4.1. Il fiume Basento	34
4.1.1. <i>La morfologia dell'asta principale del Fiume Basento</i>	34
4.1.2. <i>Il Basento a valle della S.S. 106 jonica</i>	38
4.2. Il fiume Bradano	40
4.2.1. <i>La morfologia dell'asta principale del Fiume Bradano</i>	41
4.2.2. <i>Il Bradano a valle della s.s. 106 jonica</i>	44
5. METODI SPEDITIVI PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE AREE ESPOSTE A RISCHIO DI INONDAZIONE	47
5.1. L'indice topografico modificato	51
6. LA VULNERABILITA' IDRAULICA NEI TRATTI VALLIVI DEI FIUMI BASENTO E BRADANO	54
7. I MODERNI SISTEMI DI ACQUISIZIONI IN CONTINUO PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA E MORFOLOGICA	57

7.1.	Fotogrammetrica digitale e produzione di ortofoto _____	58
7.2.	Il laser scanning _____	60
7.2.1.	<i>L'orientamento dello strumento</i> _____	61
7.2.2.	<i>Il funzionamento dei telemetri laser aviotrasportati</i> _____	62
8.	TECNOLOGIA LASER-SCAN E AEROFOTOGRAMMETRIA LUNGO LA COSTA JONICA LUCANA _____	66
8.1.	la costruzione del DTM laser _____	66
8.2.	La realizzazione delle ortofoto _____	69
8.3.	Verifica delle informazioni estratte dal MKP (<i>Model Key Point</i>) _____	70
9.	L'ANALISI IDROLOGICA _____	74
10.	LA TARATURA DEI MODELLI _____	78
11.	L'ANALISI IDRAULICA BIDIMENSIONALE _____	81
11.1.	Sulla risoluzione della griglia di calcolo _____	82
12.	CONFRONTO TRA MODELLI MONO E BIDIMENSIONALI _____	87
13.	LA DELIMITAZIONE DELLE AREE ALLAGABILI A VALLE DELLA S.S. JONICA E L'INTERAZIONE FRA BRADANO E BASENTO _____	106
14.	PROPOSTA DI PERIMETRAZIONE _____	93
14.1.	Le attuali prescrizioni nelle aree a rischio di inondazione _____	98
14.2.	La modifica proposta _____	100
15.	CONCLUSIONI _____	104

1. INTRODUZIONE

Il rischio naturale legato alle catastrofi idrogeologiche è uno dei maggiori problemi che affliggono l'Italia sia per i danni prodotti sia per il numero di vittime che si contano ogni anno. Infatti l'Italia è un paese dove l'esposizione al rischio di calamità naturali è particolarmente elevata, pur non raggiungendo i livelli che caratterizzano alcune "aree critiche" tristemente famose a livello internazionale (Giappone, Bangladesh, Stati Uniti, ecc.).

Il rischio idrogeologico è diffuso in modo capillare su tutto il territorio e si presenta in modo differente a seconda dell'assetto geomorfologico: frane, esondazioni e dissesti morfologici. Tra i fattori naturali che predispongono a tale rischio rientra senza dubbio la conformazione geologica e geomorfologica caratterizzata da un'orografia giovane e da rilievi in via di sollevamento.

Oltre alle cause "naturali" (metereologiche, morfologiche, litologiche, strutturali, idrogeologiche, ecc.) legate all'assetto del territorio, vanno sempre più assumendo un peso rilevante nell'innescare di fenomeni di dissesto le cause "antropiche", legate all'uso del suolo ed in generale alle azioni dell'uomo sull'ambiente, che determinano l'alterazione delle condizioni di equilibrio. Tali azioni, realizzate frequentemente senza tenere conto della reale possibilità di trasformabilità del suolo, sono spesso incompatibili con le condizioni di estrema fragilità del territorio e comportano così l'aumento della vulnerabilità e del rischio per le popolazioni ed i beni.

Il ripetersi, com'è avvenuto negli ultimi anni in Italia ed in Europa, di eventi catastrofici ha messo in evidenza la necessità improrogabile che la pianificazione, ai vari livelli, assuma la tematica della difesa del suolo tra i criteri prioritari per la definizione di una programmazione coerente con le reali possibilità di trasformazione del nostro territorio.

Una gran parte dell'espansione urbana in Italia si è realizzata, infatti, senza porre la necessaria attenzione ai caratteri delle diverse aree, della loro complessità e specificità. Si è quindi giunti ad urbanizzare ed edificare, anche intensamente, aree di naturale pertinenza fluviale, a interrompere a volte la continuità delle reti idrauliche, a cancellare in molti casi il reticolo idrografico minore, a ridurre in maniera sistematica le sezioni idrauliche dei corsi d'acqua. Inoltre, l'abbandono

dell'attività primaria esercitata su vaste aree ha comportato la diminuzione della manutenzione delle opere destinate alla conservazione del suolo con conseguente aumento della probabilità di innesco di fenomeni di alterazione del territorio.

Parlare di difesa del suolo vuol dire impostare una strategia di pianificazione territoriale e di prevenzione dei rischi che affronti in maniera sistematica e programmatica i problemi, che progetti le soluzioni, coordini le leggi e le direttive, e proceda, in primo luogo, alla rapida messa in sicurezza delle aree a maggior rischio idrogeologico del Paese.

La prevenzione è finalizzata soprattutto alla riduzione dei rischi e dei danni umani e materiali che il dissesto idrogeologico può causare e si attua attraverso interventi diretti a limitare l'incidenza delle cause di innesco dei dissesti.

Tra tali interventi rientra la redazione di *carte di pericolosità* volte a definire le aree a maggior rischio idrogeologico: la delimitazione delle aree a rischio di frana e di allagamento consente alle autorità competenti di attivare una consapevole pianificazione ed una responsabile gestione del territorio.

La valutazione delle aree esposte al pericolo idrogeologico rappresenta un problema di grande complessità viste le incertezze di determinazione dovute alle semplificazioni che necessariamente le accompagnano.

Una valutazione a scala nazionale riguardante l'esposizione al rischio frana e alluvione è stata prodotta all'interno del progetto AVI – Aree Vulnerate Italiane (<http://www.gndci.pg.cnr.it/>). Si tratta di una raccolta e catalogazione sistematica delle catastrofi naturali verificatesi sull'intero territorio nazionale tra il 1900 e il 2001 che, tuttavia, non consentono una definizione locale della pericolosità.

La comunità scientifica risponde alla richiesta di metodologie per l'individuazione delle aree a rischio idrogeologico presentando proposte più o meno complesse. La disponibilità di modelli digitali del terreno ad alta risoluzione ha senza dubbio favorito lo sviluppo di modelli speditivi, definiti "*DEM-based*" e cioè basati sull'analisi diretta della morfologia fluviale (*Williams et al., 200, Gallant , 2003, Nardi et al., 2006*). Per quel che riguarda il rischio di inondazione, è emerso che le aree esposte a tale rischio sono fortemente legate ad alcune caratteristiche geomorfologiche del territorio e mostrano una forte dipendenza dall'indice topografico proposto da *Kirkby* funzione, a sua volta dell'area drenata e della pendenza.

Di maggiore dettaglio sono, invece, gli studi prodotti dalle varie Autorità di Bacino presenti in Italia a partire dall'entrata in vigore della *Legge 183/89*: attraverso la redazione del PAI (*Piano per l'Assetto Idrogeologico*). Tali enti provvedono alla gestione integrata del territorio garantendo il contenimento del rischio e l'uso sostenibile della risorsa idrica.

La ricerca qui presentata risponde proprio all'esigenza dell'Autorità di Bacino Interregionale di Basilicata di definire un approccio metodologico adeguato per la determinazione di una corretta estensione delle aree inondabili, adeguati valori delle altezze idriche e delle velocità della corrente per i diversi eventi simulati in zone particolarmente sensibili del suo territorio.

L'area di interesse è la fascia jonica lucana che si estende dalla S.S. 106 jonica fino al mare: qui le particolari caratteristiche morfologiche hanno impedito di adoperare gli stessi criteri di valutazione utilizzati per i tratti medio-alti dei corsi d'acqua lucani che sfociano nel Mar Jonio (Bradano, Basento, Cavone, Agri e Sinni) e per i quali è stato recentemente aggiornato il perimetro delle aree inondabili.

L'individuazione del rischio di inondazione nelle aree pianeggianti e costiere, come quella in esame, è sempre apparsa difficoltosa: mentre nelle aree di montagna o collinari la presenza di ben definiti limiti morfo-altimetrici facilita l'individuazione delle aree potenzialmente allagabili, nelle pianure, invece, la modesta pendenza dal terreno non consente un'accurata e precisa determinazione delle porzioni di territorio inondabili.

Inoltre la crescente occupazione da parte dell'uomo registrata negli ultimi decenni rende l'area di interesse più esposta al rischio di inondazione e giustifica la necessità di pervenire al più presto alla definizione delle aree allagabili ed alla conseguente predisposizione di misure adeguate a tutela di persone e beni.

Per quel che riguarda le misure adottate oggi le Autorità di Bacino, attraverso il Piano di Bacino, non si limitano ad imporre restrizioni ma, si preoccupano anche della trasformabilità delle aree a rischio. In questo contesto l'attività di governo del rischio idraulico non va più vista come un ostacolo insormontabile allo sviluppo socio-economico del territorio ma, piuttosto come l'occasione per individuare procedure tecniche supportate da conoscenze condivise per sottoporre le scelte di trasformazione e di uso del territorio a verifiche adeguate.

La pianificazione di bacino può oggi contare sulla grande disponibilità, sul piano tecnologico, di sofisticate tecniche di rilevamento, di sistemi informativi geografici (GIS) e modelli matematici che contribuiscono in maniera significativa alla costruzione del complesso sistema di supporto alle decisioni necessario per effettuare verifiche e previsioni.

Lo studio delle aree inondabili qui presentato è svolto facendo riferimento sia a tecniche di rilevamento tradizionale (rilievo topografico di sezioni trasversali lungo i corsi d'acqua) sia a moderni sistemi di acquisizione in continuo delle caratteristiche geometriche e morfologiche (rilevi aerofotogrammetrici, laser-scan e immagini telerilevate). In particolare i modelli digitali altimetrici del terreno ottenuti dal rilievo laser-scan consentono di superare i limiti imposti dall'utilizzo della vecchia cartografia nello studio dei caratteri morfologici della pianura costiera lucana. All'analisi morfologia è, appunto dedicata la prima parte dello studio: tradizionali e moderne tecniche di rilevamento sono adoperate per la caratterizzazione morfologica dell'asta principale dei Fiumi Basento e Bradano con particolare attenzione ai tratti fluviali che si estendono a valle della S.S: 106 jonica.

Per lo studio idraulico finalizzato alla determinazione delle aree inondabili per differenti periodi di ritorno T_R nei tratti vallivi dei fiumi in esame si è verificata la capacità del DTM (*Digital Terrain Model*) ottenuto dal rilievo laser-scan di fornire informazioni adeguate all'implementazione dei modelli matematici mono e bidimensionali utilizzati. Si tratta di un particolare DTM definito MKP (*Model Key Points*. Il MKP) leggero e gestibile anche con hardware poco potenti perché, diradando la nuvola di punti rilevati sulle zone omogenee e conservando un opportuno infittimento in corrispondenza delle discontinuità del terreno, permette una facile visualizzazione della morfologia del territorio.

La modellistica numerica bidimensionale ha consentito la perimetrazione delle aree inondabili in una zona (fascia jonica) dove i recenti studi condotti dall'AdB di Basilicata hanno evidenziato l'inadeguatezza dei modelli monodimensionali. In aggiunta, il ricorso a due differenti software per la modellazione 2D (FLO-2D di J. O'Brein e MIKE 21 HD del *Danish Hydraulic Institute*) ha permesso di confrontare le capacità di simulazione di ciascuno. I risultati ottenuti da tali simulazioni sono stati altresì confrontati con quelli del modello monodimensionale implementato dal sistema HEC-RAS sviluppato presso l'*Hydrologic Engineering Center, dall'United*

States Army Corps of Engineers verificando le differenze in termini di massima area inondabile e di tirante.

Alle moderne tecniche di rilievo si è ricorso anche per la taratura dei modelli che è avvenuta attraverso il confronto tra la massima larghezza in superficie dell'area allagata in occasione di un evento di piena letta sulle immagini radar ERS 2 (gentilmente messe a disposizione dall'ESA) e quella ricavata dall'applicazione dei modelli.

I risultati ottenuti dalle simulazioni idrodinamiche bidimensionali consentono di verificare la massima estensione dell'area inondabile per diversi periodi di ritorno T_R nel porzione di territorio che dalla S.S. 106 jonica giunge fino a mare.

Conclude il lavoro la proposta di modificare l'attuale distinzione delle aree di pertinenza fluviale (ad elevata, a moderata e a bassa frequenza di inondazione) proposta dall'AdB di Basilicata facendo riferimento, non solo al tempo di ritorno T_R , *ma* anche al tirante massimo raggiunto.

2. LA DELIMITAZIONE DELLE AREE INONDABILI

Il principale riferimento normativo nazionale nel settore della difesa del suolo è costituito dalla *Legge 183/89* e dalle sue successive integrazioni. Tale legge si pone come obiettivo, attraverso la conoscenza, la pianificazione e la programmazione di interventi e regole gestionali del territorio e delle risorse ambientali, la difesa e la valorizzazione del suolo e del sottosuolo, nonché la difesa della qualità delle acque superficiali e sotterranee, al fine di garantire sia lo sviluppo delle attività umane, che la tutela della salute e l'incolumità delle persone. Con la *Legge 183* viene avviato un profondo processo di riordino delle competenze in materia di gestione e tutela territoriale ed ambientale, il cui perno è costituito dalla unitarietà di visione degli ambiti di intervento (bacini idrografici). Tale visione unitaria rappresenta il punto di partenza per porre rimedio ai danni e al degrado che le logiche di frammentazione amministrativa del territorio ed il conseguente frazionamento delle competenze, nonché il mancato coordinamento degli interventi, hanno inevitabilmente creato, e le cui conseguenze sono spesso pagate anche in termini di vite umane e di danni economici ingenti. La legge, dunque, individua nel bacino idrografico l'ambito fisico di riferimento per gli interventi di pianificazione territoriale dotando ognuno di essi di una Autorità di governo (*Autorità di Bacino*) in grado di realizzare il necessario coordinamento tra l'azione conoscitiva del territorio in esame e la gestione degli interventi attuati dai diversi soggetti istituzionali, responsabili territorialmente. Per ogni bacino idrografico, inoltre, è prevista l'elaborazione di un *Piano di Bacino* per la pianificazione e la programmazione di interventi di difesa e valorizzazione del suolo, per la difesa della qualità delle acque, per la gestione del patrimonio idrico e per gli usi di razionale sviluppo economico e sociale. In definitiva il *Piano di Bacino* è lo strumento attraverso cui pianificare, gestire e tutelare.

La *Legge 493/93*, alla luce delle difficoltà metodologiche e procedurali, modifica la *L.183/89*, consentendo la realizzazione di un *Piano di Bacino* per stralci relativi a settori o "*tematismi*" ben distinti tra di loro (es. tutela delle acque, difesa dalle alluvioni, difesa dalle frane,...).

Successivamente alla *L.183/89* sono state emanate una serie di norme che illustrano indicazioni specifiche nel settore. Ad esempio, all'indomani della tragedia

di Sarno, il Consiglio dei Ministri emana il D.L. 180/98 recante “*Misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella Regione Campania*”, convertito dalla *Legge 03/08/98 n. 267*, e modificato dalla *Legge 13/07/99 n. 226* e dalla *Legge 11/12/00 n. 365*. Le ultime modifiche al *D.L. 180/98* sono introdotte dalla *Legge 365/2000* che trasforma in legge il *Decreto Legge 279/2000* o decreto “Soverato”, emanato in clima di emergenza dovuto alla catastrofe verificatasi in Calabria appunto nel 2000.

La *Legge 267/98* prevede l’obbligo, per le Autorità di Bacino di rilievo nazionale ed interregionale e per le regioni per i restanti bacini, di adottare i *Piani Stralcio per l’Assetto Idrogeologico*, che contengano in particolare l’individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio. Nelle aree suddette, le regioni individuano le infrastrutture ed i manufatti di ogni tipo che determinano rischi idrogeologici, per i quali i soggetti proprietari possono accedere alle misure di incentivazione allo scopo di adeguare le infrastrutture e di rilocalizzare fuori dell’area a rischio le attività produttive e le abitazioni private.

In ottemperanza a quanto previsto dalla legge sulla difesa del suolo, sono stati emanati una serie di atti di indirizzo e coordinamento, contenuti nei *D.P.C.M. 23/3/90*, *D.P.R. 14/4/1994*, *D.P.R. 18/7/95*, e *D.P.C.M. 29/9/98* che costituiscono ulteriori riferimenti normativi nei quali sono contenute le informazioni tecnico-procedurali necessarie alla redazione dei *Piani di Bacino e dei Piani Stralcio*. Particolare importanza merita l’atto di indirizzo e coordinamento del 29/9/98 contenente le linee metodologiche per arrivare alla perimetrazione delle aree a rischio sia di frana che di alluvione.

La recente proposta di direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvione sottolinea la preoccupazione della Comunità Europea per le conseguenze del cambiamento climatico e la necessità di addivenire ad una comune programmazione per la difesa dal rischio di inondazione. Il Parlamento Europeo, riunito a Strasburgo il 25 aprile 2007, ha adottato 27 emendamenti relativi alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvione [P6_TC2-COD(2006)0005]. In tali emendamenti si legge della necessità del coordinamento degli Stati membri e della cooperazione con i paesi terzi per un’efficace gestione del rischio, dell’attenzione che si dovrebbe prestare nell’elaborare le politiche relative agli usi idrici e territoriali considerando anche gli effetti potenziali di tali politiche sul rischio di alluvione, della necessità di elaborare

mappe della pericolosità e del rischio in cui siano riportate le potenziali conseguenze negative associate ai vari scenari di alluvione e dell'obbligo di predisporre opportuni piani di gestione del rischio stesso. In particolare, *al fine di conferire maggiore spazio ai fiumi, tali piani dovrebbero comprendere il mantenimento e/o il ripristino delle pianure alluvionali nonché misure volte a prevenire e ridurre i danni alla salute umana, all'ambiente, al patrimonio culturale e all'attività economica.* Per quel che riguarda gli strumenti da adottare per attuare la gestione del rischio, l'emendamento 18 suggerisce che *Gli Stati membri dovrebbero basare le loro valutazioni, le loro mappe e i loro piani sulle "migliori pratiche" e sulle "migliori tecnologie disponibili",*

2.1. LA DEFINIZIONE DI RISCHIO

Nel campo della pianificazione territoriale ed ambientale il concetto di rischio viene utilizzato a scopo di prevenzione dei danni temuti e, più precisamente, allo scopo di gestire il territorio in modo da ridurre i danni a un livello socialmente accettabile. La scelta di questo livello, tuttavia, è data dalla difficile convergenza di interessi sociali, economici, ambientali, sanitari e politici.

Il rischio (R) è definito come l'entità del danno atteso in una data area e in un certo intervallo di tempo al verificarsi di un particolare evento calamitoso. Nel concetto di rischio sono presenti diverse componenti: l'evento, la probabilità che tale evento si verifichi, il contesto ambientale, gli elementi coinvolti dall'evento ed il danno che può essere prodotto.

L'impostazione attualmente accettata in Italia in materia di definizione del rischio è basata sulla definizione riportata dal *D.P.C.M. 29/09/98* per l'attuazione del *D.L. 180/98*. Secondo tale impostazione, il rischio idraulico R , può essere definito come il prodotto di tre fattori:

$$R = P \times E \times V \quad (2.1)$$

ovvero:

$$R = P \times D \quad (2.2)$$

dove

$$D = ExV \quad (2.3)$$

Per un dato elemento a rischio, cioè, l'entità dei danni attesi è correlata a:

- la pericolosità (P), ovvero la probabilità di occorrenza dell'evento calamitoso entro un certo intervallo di tempo ed in una zona tale da influenzare l'elemento a rischio, tale fattore nella suddetta formula indica proprio la probabilità di inondazione;
- il valore esposto (E), ovvero il valore (che può essere espresso in termini monetari o di numero o quantità di unità esposte) della popolazione, delle proprietà e delle attività economiche, inclusi i servizi pubblici, a rischio in una data area, tali elementi vengono comunque quantificati raggruppandoli per grado di omogeneità;
- la vulnerabilità (V) ovvero il grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio risultante dal verificarsi dell'evento calamitoso temuto, espresso in una scala da zero (nessun danno) a uno (perdita totale). E' questo il parametro più misterioso e imponderabile, a cui è difficile attribuire un valore. Ogni qualvolta si ritenga a rischio la vita umana, la vulnerabilità viene assunta unitaria. Per quanto riguarda gli elementi di altro tipo, occorre provvedere ad analisi di dettaglio; in assenza di informazioni sufficienti, comunque, anche a tali elementi si tende ad attribuire un valore di vulnerabilità ancora unitario.
- Il danno (D) è definito come il grado previsto di perdita, di persone e/o beni, a seguito di un particolare evento calamitoso, funzione sia del valore esposto che della vulnerabilità.

Dalle relazioni riportate discende che il rischio da associare ad un determinato evento calamitoso dipende dalla intensità e dalla probabilità di accadimento dell'evento, dal valore esposto degli elementi che con l'evento interagiscono e dalla loro vulnerabilità.

La valutazione del rischio comporta non poche difficoltà per la complessità e l'articolazione delle azioni da svolgere ai fini di un'adeguata quantificazione dei fattori che lo definiscono. E', infatti, assai complicato giungere ad una parametrizzazione, in termini probabilistici, della pericolosità e della vulnerabilità e, in termini monetari, del valore esposto. Per lo stesso motivo, anche la mitigazione

del rischio (che può essere attuata, a seconda dei casi, su uno o più elementi tra quelli sopra riportati) risulta essere un'operazione molto complessa.

Il già citato *D.L. 180/98* distingue quattro categorie di rischio, definito prevalentemente sulla base del tipo di danno prodotto:

- rischio moderato (*R1*): per il quale i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali;
- rischio medio (*R2*): per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità del personale, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche;
- rischio elevato (*R3*): per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socioeconomiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale;
- rischio molto elevato (*R4*): per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socioeconomiche.

Nella identificazione delle aree vulnerabili, visto che i fattori che concorrono a determinare la soggezione di un'area a fenomeni di inondazione non sono sempre facilmente identificabili lo stesso D.P.R. rimanda, ove non sono possibili analisi di maggior dettaglio, all'analisi delle aree storicamente vulnerare, le aree cioè che nel passato sono state interessate da eventi idrogeologici disastrosi. Esiste infatti una tendenza di questi eventi a riprodursi nel tempo con caratteristiche in qualche misura analoghe, così che l'identificazione delle aree vulnerate porta ad determinare un'aliquota verosimilmente consistente delle aree vulnerabili. Naturalmente eventi futuri potranno interessare anche zone mai colpite, o per la rarità del fenomeno o per le mutate condizioni ambientali o antropiche. C'è poi da aspettarsi che eventi del passato potranno non ripetersi nell'orizzonte temporale di interesse, perché è molto elevato il loro periodo di ritorno o perché gli interventi antropici di sistemazione o la dinamica naturale del fenomeno attraverso il raggiungimento di nuove condizioni di equilibrio hanno ridotto la pericolosità del fenomeno.

2.2. IL PIANO DI BACINO

La definizione di *Piano di Bacino* è contenuta L. 183/89: esso rappresenta *lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo e alla corretta utilizzazione delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche e ambientali del territorio interessato*. E' dunque un piano territoriale di settore, che individua nel bacino idrografico l'ambito fisico di riferimento per gli interventi di pianificazione e gestione territoriale.

Il Piano ha una duplice valenza, conoscitiva e di pianificazione-programmazione. E', infatti, uno strumento di natura conoscitiva poiché rappresenta un quadro di informazioni, opportunamente raccolte ed organizzate, in continuo ampliamento ed approfondimento, da cui emergono le criticità ambientali, lo stato qualitativo e quantitativo delle risorse, le situazioni di emergenza territoriale e settoriale ed i problemi legati alla componente antropica. Per la realizzazione di questo quadro conoscitivo ci si avvale anche dell'integrazione di strutture finalizzate alla raccolta ed alla gestione delle conoscenze (sistemi di monitoraggio, sistemi informativi, strutture di controllo). La funzione conoscitiva del Piano riguarda, infine, la delimitazione del quadro mutevole dei bisogni e dei problemi del bacino e l'elaborazione delle linee strategiche di intervento.

Al Piano come strumento programmatico compete, invece, l'elaborazione di programmi d'intervento a termine basati sulla priorità, sulle risorse disponibili, sulla capacità operativa delle strutture preposte agli interventi e sullo stato delle conoscenze acquisite in precedenza.

Il D.P.C.M. 23/3/90, il D.P.R. 7/1/92 e il D.P.R. 18/7/95 costituiscono ulteriori riferimenti normativi nei quali sono contenute le informazioni tecnico-procedurali necessarie alla redazione dei Piani di Bacino. Si definiscono così i bacini idrografici di valenza nazionale, interregionale, regionale e pilota, si stabiliscono i contenuti della programmazione, della attività conoscitive e le modalità di rappresentazione delle informazioni disponibili.

Nella L. 183/89 e nei suoi aggiornamenti il Piano è quindi inteso in senso globale e la sua individuazione non può prescindere dalla conoscenza dell'intero territorio per quanto riguarda sia le sue caratteristiche naturali e le problematiche ambientali e socio-economiche sia il tipo e la disponibilità delle risorse. Il Piano di Bacino può

essere redatto ed approvato anche per sottobacini o per stralci relativi a settori funzionali (L. 493/93). Il PAI (*Piano Stralcio per la difesa dal Rischio Idrogeologico*), infatti, rappresenta uno stralcio di settore funzionale del Piano di Bacino.

Questa possibilità offre il vantaggio dell'immediatezza sia nella fase conoscitiva che in quella della programmazione degli interventi e delle misure di salvaguardia, elementi fondamentali ed imprescindibili del *Piano Stralcio*.

2.3. IL PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (PAI)

Così come prescritto dalla legge, il PAI costituisce a tutti gli effetti uno stralcio funzionale del Piano di Bacino e, pertanto, ha valore di Piano Territoriale di Settore. Attraverso il *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico* (o *Piano Stralcio per la Difesa dal Rischio Idrogeologico*) le Regioni per la prima volta si dotano di un importantissimo, strategico ed organico strumento di pianificazione, di prevenzione e di gestione delle problematiche territoriali.

Il PAI, che disciplina le azioni riguardanti la difesa idrogeologica del territorio e della rete idrografica del bacino attraverso l'individuazione delle linee generali di assetto idraulico e idrogeologico, contiene le seguenti informazioni essenziali:

- la perimetrazione degli eventi franosi o delle aree alluvionate storicamente;
- gli elementi, manufatti ed infrastrutture, che determinano le condizioni di rischio;
- la perimetrazione delle aree soggette a rischio idrogeologico;
- la classificazione delle aree soggette a rischio idrogeologico;
- le misure di salvaguardia;
- la rappresentazione spaziale di tutte le caratteristiche e gli elementi di conoscenza multidisciplinare del bacino idrografico;
- le priorità degli interventi per attuare l'eliminazione o la mitigazione delle situazioni a rischio;
- le modalità di controllo e monitoraggio finalizzate alla prevenzione degli eventi potenzialmente dannosi;
- le modalità di diffusione e accesso alle informazioni da parte degli enti amministrativi.

Per quel che riguarda nello specifico il rischio di alluvione, la pianificazione contemplata nei PAI è realizzata attraverso tre fasi:

- una *fase conoscitiva*, nella quale occorre procedere, da un lato, all'analisi dello stato di fatto, delineando l'assetto attuale della rete idrografica del bacino e le cause determinanti di esso (analisi storica), e, dall'altro, alla raccolta dei dati storici disponibili sulle alluvioni osservate nel passato, sui danni verificatisi, sul comportamento delle strutture, danneggiate o meno, in modo da individuare un grado di vulnerabilità al dissesto della zona in esame;
- una *fase di elaborazione*, nella quale valutate le portate massime e i volumi massimi che possono defluire in corrispondenza di diversi periodi di ritorno e di diverse durate, si procede ad uno studio idraulico del sistema, utilizzando modelli matematici via via più dettagliati in relazione al problema considerato;
- una *fase di programmazione*, in cui occorre indicare gli obiettivi da conseguire mediante interventi strutturali (miranti alla riduzione del rischio di piena) e non strutturali (volti alla riduzione della vulnerabilità del territorio e dei costi conseguenti al potenziale danneggiamento), con l'elenco degli interventi prioritari in ragione delle disponibilità finanziarie.

2.4. IL PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO IN BASILICATA

L'Autorità di Bacino (AdB) della Basilicata, istituita con legge regionale n.2 del 25 Gennaio 2001, è una struttura di rilievo interregionale in quanto comprende porzioni del territorio della Basilicata, della Puglia e della Calabria.

Il principale strumento di pianificazione dell'AdB è il *Piano di Bacino*, il cui primo stralcio funzionale, relativo alla "Difesa dal Rischio Idrogeologico" è stato redatto dalla Segreteria Tecnica Operativa e approvato dal proprio Comitato Istituzionale in data 5/12/2001 ed in vigore dal 14/01/2002. Le tematiche riguardanti le inondazioni e i processi d'instabilità dei versanti sono contenute rispettivamente nel *Piano delle fasce fluviali* e nel *Piano delle aree di versante*.

La prima stesura del Piano è stata redatta sulla base degli elementi di conoscenza disponibili alla data di predisposizione dello stesso (anno 2001) che sinteticamente sono:

- areali franosi desunti dai Piani Urbanistici dei comuni dell'AdB;
- aree ad alto rischio idrogeologico individuate dal Piano Straordinario redatto ai sensi dell'art. 9, comma 2 della L.226/99 di modifica del D.L. 180/98;
- aree a rischio idrogeologico oggetto di studio e sopralluoghi da parte del Gruppo Nazionale Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del CNR;
- segnalazioni provenienti dall'attività straordinaria di sorveglianza e ricognizione lungo i corsi d'acqua e le relative pertinenze;
- segnalazioni da parte di Amministrazioni e Enti Pubblici operanti sul territorio;
- studi idrologici e idraulici del reticolo idrografico.

Il riferimento territoriale del PAI, esteso complessivamente per 8830 Km², è costituito dal territorio totale o parziale dei comuni ricadenti nei bacini idrografici interregionali dei fiumi Bradano, Sinni e Noce e nei bacini idrografici dei fiumi regionali lucani Basento, Cavone e Agri. Complessivamente i comuni interessati dall'AdB della Basilicata sono 118 di cui 72 appartengono alla provincia di Potenza, 31 alla provincia di Matera, 6 alla provincia di Cosenza, 7 alla provincia di Bari e 2 a quella di Taranto.

Regione	Provincia	Numero di Comuni
Basilicata	Potenza	72
Basilicata	Matera	31
Puglia	Bari	7
Puglia	Taranto	2
Calabria	Cosenza	6
	TOTALE	118

Equazione 2.4. Territorio di competenza dell' AdB della Basilicata

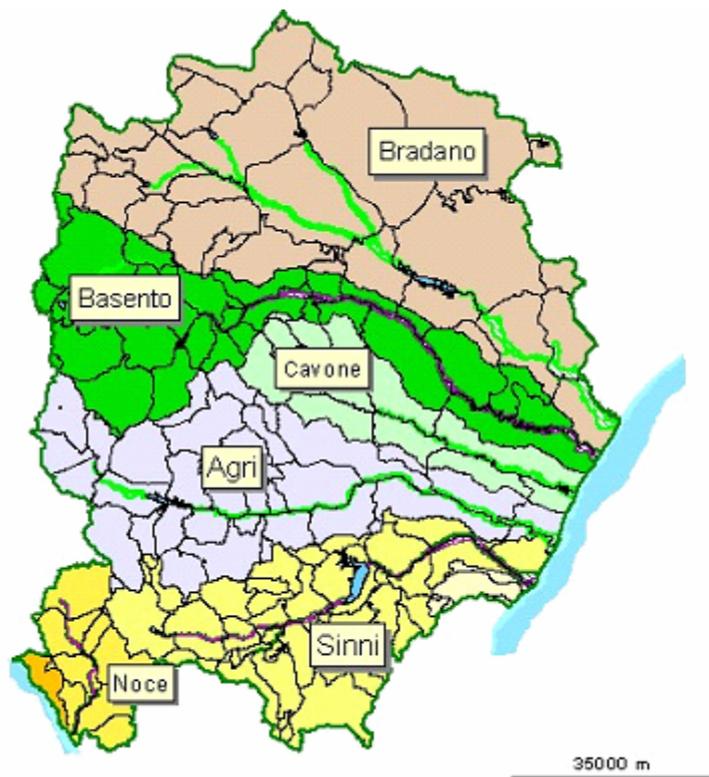


Figura 2.1. Territorio di competenza dell’Autorità di Bacino Interregionale della Basilicata con indicazione dei bacini idrografici.

Non tutto il territorio lucano, esteso complessivamente per 9.992,27 km², e comprendente 131 comuni, è di competenza dell’AdB della Basilicata: ne sono esclusi, infatti, i comuni del comprensorio del *Marmo-Platano* e del *Melandro*, estesi per 835 km², appartenenti al bacino idrografico interregionale del fiume *Sele* (*Autorità di Bacino Interregionale del Sele*), quelli del comprensorio del *Vulture-Melfese*, estesi per 1.308 km², appartenenti al bacino idrografico interregionale del fiume *Ofanto* (*Autorità di Bacino della Puglia*), ed alcuni comuni a Sud del *Pollino* lucano, estesi per 178 km², appartenenti al bacino idrografico interregionale del fiume *Lao* (*Autorità di Bacino della Calabria*).

Il PAI è stato concepito come uno strumento di pianificazione aperto e in continuo aggiornamento ed è pertanto continuamente integrato con studi e approfondimenti. In base a quanto previsto dall’articolo 25 delle *Norme di Attuazione del PAI*, l’*Autorità di Bacino* redige annualmente l’approvazione degli aggiornamenti del Piano al fine di tener conto dell’evoluzione del quadro conoscitivo, degli approfondimenti e degli studi intrapresi, dello stato di realizzazione degli interventi programmati, della dinamica morfologica e ambientale dei luoghi e, infine, delle

eventuali segnalazioni pervenute all'AdB da parte di soggetti pubblici e privati. L'ultimo aggiornamento risale al 20.07.2007.

Per quel che riguarda il rischio di alluvione ad oggi l'AdB di Basilicata ha provveduto alla delimitazione delle aree inondabili per eventi di piena con periodi di ritorni T_R di 30, 200 e 500 anni lungo le aste principali dei sei fiumi lucani: Bradano, Basento, Cavone, Agri, Sinni e Noce. Lo studio idraulico è stato realizzato adottando modelli di simulazione monodimensionale in condizioni di moto permanente.

L'inadeguatezza dei modelli matematici monodimensionali adottati nel simulare la propagazione dell'onda di piena in aree estremamente pianeggianti, come quella della fascia jonica, ha portato l'AdB a non aggiornare alcuni limiti delle aree inondabili lungo i tratti fluviali che si estendono a valle della S.S. 106 jonica. Conseguentemente nei soli tratti vallivi dei corsi d'acqua lucani che sfociano nel Mar Jonio si osserva la seguente situazione:

- le aree inondabili con $T_R = 30$ e 500 anni sono delimitate solo nei tratti fluviali per i quali la presenza di arginature sufficienti a contenere le portate di piena considerate giustifica l'utilizzo di modelli matematici monodimensionali;
- l'area inondabile con $T_R = 200$ anni, non aggiornata, ripropone il vecchio perimetro valutato in maniera speditiva nel 2001.

Facendo riferimento ai tratti fluviali a valle della S.S. 106 jonica dei fiumi in esame, nella Figura 2.2 si mostra uno stralcio della *Carta delle aree inondabili* dove è possibile notare la presenza delle aree inondabili per $T_R = 30$ e 200 anni nel caso del Basento e la sola presenza dell'area inondabile per $T_R = 200$ nel caso del Bradano.

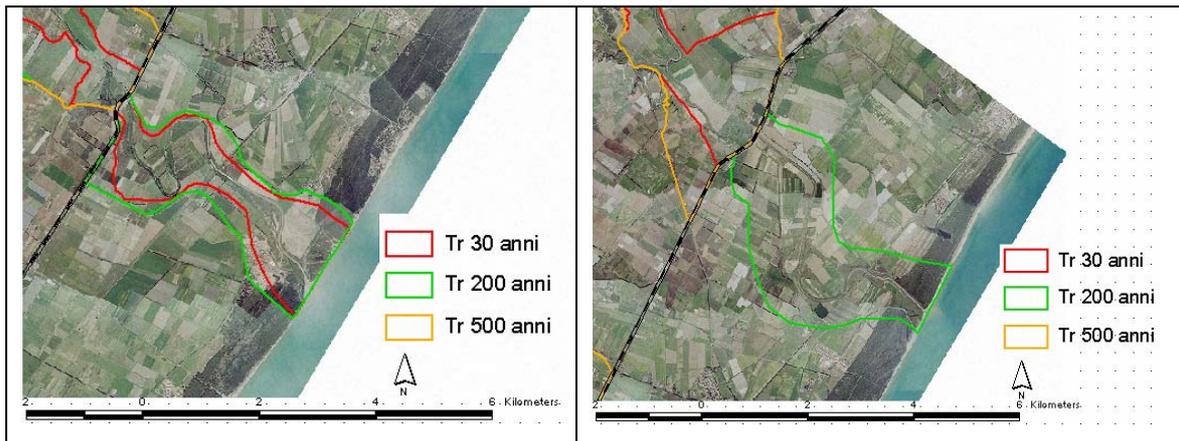


Figura 2.2. Delimitazione delle aree inondabili per T_R pari a 30, 200 e 500 anni in corrispondenza delle foci del F. Basento (a sinistra) e del F. Bradano (a destra) su ortofotocarta. La linea tratteggiata nera indica la S.S. 106 jonica.

3. LA MODELLISTICA NUMERICA A SUPPORTO DELLA INDIVIDUAZIONE DELLE AREE INONDABILI

L'obbligo legislativo delle Autorità di Bacino di determinare le aree a rischio di inondazione ha favorito senza ombra di dubbio lo sviluppo e l'utilizzo della modellistica numerica per studiare la propagazione delle piene.

In generale, un modello è costituito da un insieme di equazioni e funzioni matematiche il cui obiettivo è quello di interpretare e descrivere determinati fenomeni fisici, chimici e biologici. Ovviamente in questa rappresentazione i fenomeni (antropici o naturali) subiscono delle semplificazioni che sono legate al grado di dettaglio, spaziale e temporale, che si vuole ottenere con le risposte del modello.

I modelli di propagazione rappresentano una interpretazione teorica del comportamento idraulico della massa d'acqua che defluisce all'interno di un canale (alveo o sistema alveo-golene-area di esondazione) di geometria e caratteristiche di resistenza note. Possono essere innanzitutto distinti in monodimensionali e bidimensionali.

3.1. MODELLI MONODIMENSIONALI

Essi rappresentano gli schemi più semplici tra i modelli di propagazione dell'onda di piena. Possono essere applicati quando il percorso del fiume è orientato in un'unica direzione (fiume con argini ben definiti, assenza di brusche variazioni di sezione, alveo inciso) dal momento che alveo e area inondabile sono schematizzati mediante un semplice canale. L'eventuale esondazione è considerata come un particolare allargamento della sezione idrica ed il modello fornisce solo la velocità della corrente nella direzione perpendicolare alla sezione.

Il moto del liquido all'interno di un canale può essere simulato utilizzando tre diversi modelli: *moto uniforme*, *moto permanente* e *moto vario*.

Si ricorre al *moto uniforme* solo se l'alveo è a sezione quasi costante, con pendenza uniforme su lunghi tratti e non rigurgitato perché le caratteristiche idrauliche e geometriche sono assunte costanti nello spazio e nel tempo. Il *moto*

uniforme, che rappresenta il più semplice tra i modelli elencati, descrive il moto del fluido mediante l'equazione di Chezy:

$$Q = A\chi\sqrt{Ri_f} \quad (3.1)$$

dove Q è la portata, A l'area della sezione liquida, χ è la funzione di resistenza, R è il raggio idraulico ed i_f è la pendenza del fondo alveo.

Il modello di *moto permanente* viene utilizzato quando la geometria del canale è variabile lungo il suo asse e la portata può assumersi costante. In realtà si ricorre al *moto permanente* anche nell'ipotesi di lenta variazione nel tempo della portata. L'equazione del *moto permanente* esprime il rapporto tra le forze motrici e le forze resistenti e può scriversi nella forma:

$$gA \frac{dh}{dx} + \frac{d(Q^2 / A)}{dx} = gA(i_f - J) \quad (3.2)$$

dove h è il tirante idrico, x è l'ascissa dell'asse dell'alveo, A è la sezione idrica, Q è la portata, i_f è la pendenza del fondo alveo e J è la pendenza della linea dell'energia.

Il modello di *moto vario* è in grado di descrivere il passaggio di un'onda nell'alveo ed il fenomeno della laminazione della piena. La sua formulazione deriva dal sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali di *De Saint Venant* che, nel caso di sistema monodimensionale, diventano:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} = i_f - J \quad (3.4)$$

dove per i simboli valgono le notazioni precedenti.

La (3.3) è l'*equazione di continuità* ed esprime il bilancio delle masse entranti ed uscenti da un generico tronco d'alveo, mentre la (3.4) è l'*equazione dell'energia*. La potenza di calcolo raggiunta dai computer negli ultimi anni ha sicuramente favorito l'utilizzo di modelli di moto vario con approcci bidimensionali. Tuttavia un buon compromesso tra i modelli monodimensionali e quelli bidimensionali può in alcuni casi essere raggiunto utilizzando **modelli quasibidimensionali**. Tali modelli, pur risolvendo le equazioni del moto in forma monodimensionale, tentano di rappresentare la bidimensionalità del fenomeno attraverso una schematizzazione a rete di canali e zone di allagamento.

3.2. MODELLI BIDIMENSIONALI

Si ricorre al più complesso modello bidimensionale quando è necessario analizzare fenomeni di esondazione al di fuori dell'alveo per i quali non è possibile trascurare le componenti della velocità ortogonali alla direzione dell'asta fluviale.

Il modello di *moto permanente* assume la seguente formulazione:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yx}) \right] = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] = 0 \quad (3.7)$$

dove la (3.5) è l'equazione di continuità, la (3.6) è l'equazione dell'energia lungo l'asse delle x, parallelo all'asse dell'alveo ed, infine, la (3.7) è l'equazione dell'energia lungo l'asse delle y, ortogonale all'asse dell'alveo.

Il modello di *moto vario*, invece, assume la seguente formulazione:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yx}) \right] = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] = 0 \quad (3.10)$$

Sia per il modello di *moto permanente* che per quello di *moto vario* valgono le seguenti notazioni:

$h(x,y,t)$ è la profondità del pelo libero;

$\xi(x,y,t)$ è la quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$ sono le portate unitarie nelle direzioni x e y;

g è l'accelerazione di gravità;

x,y sono le coordinate;

t è il tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ sono le componenti dello sforzo di taglio

L'implementazione dei modelli bidimensionali può avvenire utilizzando due metodologie: il *metodo alle differenze finite* e il *metodo agli elementi finiti*.

Per il *metodo alle differenze finite* il dominio continuo di calcolo (la porzione di territorio nella quale vanno risolte le equazioni del moto) è discretizzato da una maglia formata da linee rette o curve a passo costante. I nodi, e cioè le intersezioni della griglia, sono gli elementi rappresentativi della porzione d'area che compete loro; pertanto, in tali punti sono ricercate le soluzioni delle equazioni del moto.

Con il *metodo agli elementi finiti* il dominio di calcolo è schematizzato da elementi non sovrapposti di forma e dimensioni variabili (generalmente triangoli). Tale metodo garantisce una maggiore flessibilità nella ricerca delle soluzioni dal momento che è possibile infittire o diradare i punti soluzione del dominio.

3.3. I CODICI DI CALCOLO ADOTTATI

3.3.1. La simulazione monodimensionale con il software Hec-Ras

Il modello di simulazione HEC-RAS (*River Analysis System*), sviluppato presso l'*Hydrologic Engineering Center, dall'United States Army Corps of Engineers*, consente il calcolo dei profili idraulici di moto permanente gradualmente vario, in reti di canali naturali o artificiali (*HEC-RAS Hydraulic Reference, 2002*).

Con tale modello possono essere simulate condizioni di moto subcritico, supercritico e misto, e possono essere valutati gli effetti di immissioni o emissioni laterali di portata, opere in alveo, ostacoli al flusso e costruzioni presenti lungo le sponde.

Nelle ipotesi di condizioni di *moto permanente* unidimensionale, corrente gradualmente variata (fatta eccezione per le sezioni in cui si risente della presenza di strutture, quali ponti o tombini per attraversamento) e pendenze longitudinali del fondo dell'alveo non eccessive, per un dato tratto fluviale elementare, di lunghezza finita, il modello si basa sulla seguente equazione di conservazione dell'energia tra le generiche sezioni trasversali di monte e di valle, rispettivamente indicate coi pedici 2 e 1:

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \Delta H \quad (3.11)$$

in cui Y_2 e Y_1 sono le profondità d'acqua, Z_2 e Z_1 le quote dei punti più depressi delle sezioni trasversali rispetto a un piano di riferimento (superficie libera del medio mare), V_2 e V_1 le velocità medie (rapporto tra portata e area bagnata della sezione), α_2 e α_1 coefficienti di Coriolis di ragguaglio delle potenze cinetiche, g l'accelerazione di gravità e ΔH le perdite di carico nel tratto considerato.

Nel caso di passaggio da regime supercritico a subcritico tramite risalto idraulico, la corrente perde il carattere gradualmente variato e l'equazione dell'energia non può essere applicata. In tal caso, si ricorre all'equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\beta_2 Q_2^2}{gA_2} + A_2 Y_{2,b} + \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \cdot i - \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \cdot J_m - \frac{\beta_1 Q_1^2}{gA_1} - A_1 Y_{1,b} = 0 \quad (3.12)$$

in cui si sono indicate con i pedici 2 e 1 rispettivamente le sezioni di monte e di valle del tratto considerato; a meno del peso specifico, che essendo presente in ciascun addendo è stato eliso, il primo e il quinto termine rappresentano le spinte idrodinamiche dovute alle quantità di moto (con β coefficiente di ragguglio dei flussi di quantità di moto), il secondo e il sesto termine le spinte idrostatiche dovute alle pressioni (essendo $Y_{2,b}$ e $Y_{1,b}$ gli affondamenti dei baricentri delle sezioni bagnate), il terzo termine la componente del peso lungo la direzione del moto (essendo i la pendenza longitudinale del fondo dell'alveo, calcolata in base alle quote medie in ciascuna sezione) e il quarto termine la resistenza al moto.

Nell'ipotesi di *moto vario* HEC-RAS risolve il sistema di equazioni di *De Saint Venant* scritte nella forma completa per correnti gradualmente variate, assumendo il moto monodimensionale:

equazione di continuità:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} - q_e = 0 \quad (3.13)$$

equazione del moto:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial t} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (3.14)$$

dove Q è la portata, A è l'area bagnata, S l'area di accumulo (area della sezione che non contribuisce al deflusso), q_e è la portata per unità di larghezza dovuta agli apporti laterali, V è la velocità ed S_f è la cadente. La risoluzione del sistema di equazioni è effettuata utilizzando il modulo di calcolo UNET, in funzione di un adeguato sistema di condizioni iniziali ed al contorno, attraverso uno schema implicito alle differenze finite, definito in letteratura "*box scheme*".

3.3.2. La simulazione bidimensionale con il software FLO-2D

Il FLO-2D è un modello bidimensionale di conservazione dei volumi in cui la simulazione nelle due dimensioni è garantita dall'integrazione numerica dell'equazione del moto e della conservazione del volume sia per le portate liquide che per quelle solide:

equazione di continuità:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} = i \quad (3.15)$$

equazione del moto:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{V_x}{\partial t} \quad (3.16)$$

dove h è l'altezza idrica, V_x è la componente x della velocità media della corrente, S_{fx} è la cadente, S_{ox} è la pendenza del fondo e g è l'accelerazione di gravità (*FLO-2D User Manual, 2007*).

Le equazioni di continuità e del moto sono risolte attraverso un schema numerico alle differenze finite. L'algoritmo risolve l'equazione del momento per la velocità della corrente in corrispondenza delle celle della griglia di calcolo istante per istante.

Il dominio di simulazione è rappresentato da una griglia a maglia quadrata. La procedura di calcolo comincia col determinare la portata attraverso ciascun contorno in otto direzioni di flusso (nord, est, sud, ovest, nord-est, sud-est, sud-ovest, nord-ovest) e procede con una stima lineare dell'altezza idrica in corrispondenza della cella al contorno. Tale altezza idrica è una media delle altezze delle due celle che condividono la portata in una delle otto direzioni.

Dalla media di altri parametri idraulici vengono determinati: la velocità della corrente, l'area bagnata, la quota del pelo libero, il perimetro bagnato, ecc. La velocità della corrente, che è una variabile dipendente, è calcolata attraverso l'equazione del momento. Moltiplicando l'area bagnata media calcolata tra due elementi e la velocità è possibile ottenere la portata in ogni intervallo temporale. Infine, la variazione netta di volume d'acqua in ogni cella del floodplain ad ogni

timestep è rappresentata dalla somma delle otto singole portate che attraversano il contorno. L'incremento in altezza idrica è dato da

$$\Delta d^{i+1} = \Delta Q_x^{i+1} \Delta t / SurfaceArea \quad (3.17)$$

dove Δt rappresenta l'intervallo temporale tra l'istante i ed $i+1$.

I tempi di simulazione del FLO-2D dipendono in maniera diretta dalla risoluzione della griglia di calcolo rappresentativa dell'area che si desidera studiare: è evidente, infatti, un incremento di tali tempi al crescere della risoluzione della griglia. In generale, un giusto compromesso tra la durata della simulazione e il dettaglio dei risultati si ottiene lavorando con griglie di risoluzione compresa tra 30 e 300 m.

3.3.3. La simulazione bidimensionale con il software MIKE 21

Il MIKE 21, realizzato dal *Danish Hydraulic Institute*, 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") (*MIKE 21 General Reference manual, Scientific Background, 2004*).

Il modulo idrodinamico HD 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 di *De Saint Venant* è costituito dalle seguenti equazioni:

equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3.18)$$

equazione di conservazione della quantità di moto lungo x :

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} \\
& - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fV V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a \\
& + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) = 0
\end{aligned} \tag{3.19}$$

equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} \\
& - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fV V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a \\
& + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) = 0
\end{aligned} \tag{3.20}$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$ è la profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$ è la quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$ sono le portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$ è il coefficiente di scabrezza di Chezy;

g è l'accelerazione di gravità;

$f(V)$ è il fattore d'attrito del vento;

$V, V_x, V_y(x,y,t)$ è la velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$ è il parametro di Coriolis;

$p_a(x,y,t)$ è la pressione atmosferica;

ρ_w è la densità dell'acqua;

x,y sono le coordinate spaziali;

t è il tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ sono le componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} sono le 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 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 viscosità*) che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (3.21) \text{ nella direzione } x$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hE \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.22) \text{ nella direzione } x$$

Tali 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*:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (3.23)$$

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:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} hE \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (3.24)$$

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; in realtà 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 stabilità numerica. Al termine del *soft start* si verifica che la situazione ottenuta sia di effettiva stazionarietà.

Le equazioni del modello 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*).

4. L'AREA DI STUDIO

Dei sei principali fiumi della Basilicata solo il *Noce* sfocia nel *Mar Tirreno* mentre gli altri cinque e cioè il Bradano, il Basento, il Cavone, l'Agri ed il Sinni si riversano nel Mar Jonio.

Il lavoro di tesi qui presentato riguarda proprio la fascia jonica lucana ed ha lo scopo di individuare una metodologia adeguata per la delimitazione delle aree inondabili in una zona che, per le sue caratteristiche morfologiche, richiede valutazioni diverse da quelle utilizzate per le zone medio-alte dei corsi d'acqua lucani.



Figura 4.1. Corsi d'acqua lucani che sfociano nel Mar Jonio su carta I.G.M.I. in scala 1:25000. La linea rossa rappresenta la S.S. 106 jonica mentre, quella verde, la linea ferroviaria Taranto-Reggio Calabria.

L'individuazione del rischio idraulico in aree pianeggianti e costiere, come quella in esame, è estremamente difficoltosa: mentre nelle regioni montane e collinari la presenza di ben definiti limiti morfo-altimetrici consente di individuare con notevole precisione le aree potenzialmente allagabili, nei territori pianeggianti, invece, la modesta pendenza dei suoli ostacola una netta determinazione delle porzioni di territorio interessabili da fenomeni di allagamento.

I cinque fiumi della costa jonica, nel tratto prossimo allo sbocco a mare assumono le caratteristiche morfologiche tipiche degli alvei incassati di pianura ed, inoltre, sono tutti intercettati sia dalla S.S. 106 jonica che dalla linea ferroviaria Taranto-Reggio Calabria. La presenza di affinità morfologiche (sia naturali sia legate all'intervento antropico) consente di focalizzare lo studio su due soli corsi d'acqua, il Basento e il Bradano, ritenendo plausibile l'estensione di quanto rinvenuto anche ai restanti fiumi. Trattandosi, inoltre, di due corsi d'acqua con bacini idrografici confinanti, lo studio mira anche alla individuazione di eventuali interazioni ed interferenze.

Nello specifico l'area di studio si estende per circa 80 km² in corrispondenza delle foci dei fiumi Basento e Bradano.



Figura 4.2. Territorio di competenza dell'Autorità di Bacino Interregionale di Basilicata con delimitazione dei Bacini idrografici.

4.1. IL FIUME BASENTO

Il *Basento*, l'antico *Casuentus*, è un tipico corso d'acqua mediterraneo a carattere torrentizio e con i suoi 157 km di lunghezza dell'asta principale e circa 1535 km² di estensione, è il corso d'acqua più lungo a sud del Fiume Volturno.

Il suo bacino presenta, nella parte superiore, un'ampia area di raccolta mentre, in quella inferiore, uno stretto e lungo canale di scarico. Sulla sinistra orografica la linea spartiacque del bacino è comune, nella parte alta, a quella del Fiume Sele. Proseguendo verso nord si giunge a Toppa la Taverna che rappresenta il punto di incontro degli spartiacque di quattro bacini: Sele, Ofanto, Bradano e Basento. Da qui i bacini del Bradano e del Basento restano adiacenti fino al Mar Jonio. Sulla destra idrografica, dopo un breve tratto in comune con il bacino del Sele, lo spartiacque segna il confine con i bacini dell'Agri a monte e con il Cavone e valle.

4.1.1. La morfologia dell'asta principale del Fiume Basento

Il Basento presenta una morfologia caratterizzata da zone montuose e collinari nella parte medio-alta e pianeggiante nella parte terminale.

Una prima valutazione dei caratteri morfologici dell'asta principale è stata realizzata facendo riferimento al rilievo dell'asta principale eseguito per conto dell'AdB di Basilicata nel 2004 contenente:

- i rilievi topografici delle sezioni trasversali (562) dell'asta principale e delle relative strutture idrauliche e di attraversamento;
- i risultati della campagna di rilievo delle caratteristiche granulometriche del fondo alveo;
- le ortofotocarte in formato digitale raster in scala 1:5000, di una fascia comprendente il fiume per una ampiezza di circa 2 km, i relativi punti quotati e le isoipse in formato vettoriale generate dal modello digitale del terreno.

Analizzando la pendenza del fondo alveo, la geometria delle sezioni trasversali, le curve granulometriche e l'assetto planimetrico del corso d'acqua è stato possibile individuare i tre macrotratti morfologici sotto schematizzati.

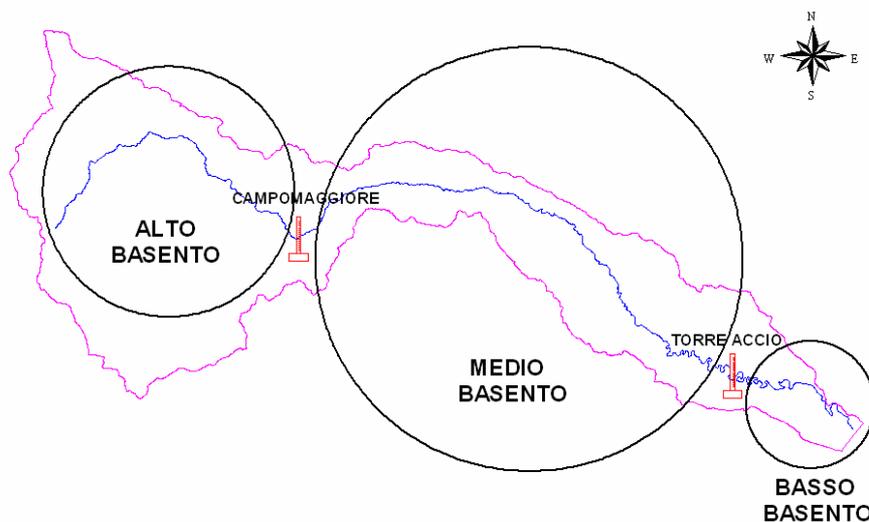


Figura 4.3. Suddivisione morfologica dell'asta principale del Fiume Basento.

Tratto morfologico	Limite di monte	Limite di valle
Alto Basento	Sorgente	Campomaggiore (BST239)
Medio Basento	Campomaggiore (BST239)	Ferrandina (BST433)
Basso Basento	Ferrandina (BST433)	foce (BST562)

Tabella 4.1. Individuazione dei limiti di monte e di valle dei macrotratti morfologici dell'asta principale del Fiume Basento. Con BST000 si indica la sezione topografica rilevata nel 2004.

Nel tratto compreso tra la sorgente e la stazione idrometrica di Campomaggiore (*Alto Basento*) l'alveo è abbastanza ristretto, le sponde acclivi e la pendenza elevata (tra l'1.8% e il 0.4%), l'ampiezza delle sezioni trasversali variabile tra 4 e 40 m, il fondo alveo caratterizzato da ghiaia con ciottoli e l'andamento planimetrico praticamente rettilineo. Proprio in prossimità del territorio di Campomaggiore (sezione topografica BST239), la pendenza del fiume aumenta, l'alveo si restringe e l'aspetto del fiume è rupestre e naturale: l'acqua scorre tra le rocce modellate dall'erosione e la boscaglia ripariale si integra con la vegetazione che ricopre le pendici del monte.

Il fiume prosegue il suo percorso insinuandosi, all'altezza di Calciano, tra il Monte La Crocchia e i monti di Tricarico. In seguito lambisce la stazione di Grassano e successivamente quella di Salandra. Qui il greto si espande in alcuni tratti su vaste golene di ciottoli e detriti. Siamo nel corso *Medio Basento*, dove il fiume acquisisce

caratteri morfologici alluvionali poiché le correnti cominciano a depositare il loro contenuto sedimentario. Cominciano ad apparire in modo cospicuo i calanchi sui versanti in argilla e la vegetazione si dirada lasciando spazio solo a qualche macchia di boscaglia ripariale costituita soprattutto da pioppi bianchi su canneto. La pendenza varia tra 0.4% e il 0.1%, l'ampiezza di fondovalle raggiunge anche le centinaia di metri, il fondo alveo è caratterizzato da ghiaia con ciottoli e le ramificazioni dell'alveo sono abbastanza frequenti.

Il Basento, continuando a percorrere la vallata, attraversa i territori dei comuni di Ferrandina e Pisticci (sezione topografica BST433) dove sono collocati importanti impianti industriali (*Basso Basento*) e, prima di sfociare nello Jonio, attraversa la piana costiera di Metaponto. Qui il fiume assume le tipiche caratteristiche di un alveo incassato con pendenza tra 0.4% e il 0.04%, ampiezza delle sezioni da 10 a 50 m, fondo alveo caratterizzato da sabbia e limo ed andamento planimetrico meandriforme.

<p>Alto Basento</p> <p>tratti con pendenza tra 1.8% e il 0.4%, ampiezza delle sezioni da 4 a 40 m, fondo alveo caratterizzato da ghiaia con ciottoli, andamento planimetrico rettilineo</p>	
<p>Medio Basento</p> <p>tratti alluvionati con pendenza tra 0.4% e il 0.1%, ampiezza fondovalle anche di centinaia di metri, fondo alveo caratterizzato da ghiaia con ciottoli, presenza di due o più ramificazioni</p>	
<p>Basso Basento</p> <p>tratti incassati con pendenza tra 0.4% e il 0.04%, ampiezza delle sezioni da 10 a 50 m, fondo alveo caratterizzato da sabbia e limo, andamento planimetrico meandriforme</p>	

Figura 4.4. Suddivisione dell'asta principale del Fiume Basento con sintesi delle principali caratteristiche morfologiche (a sinistra) e stralci planimetrici da ortofotocarta (a destra).

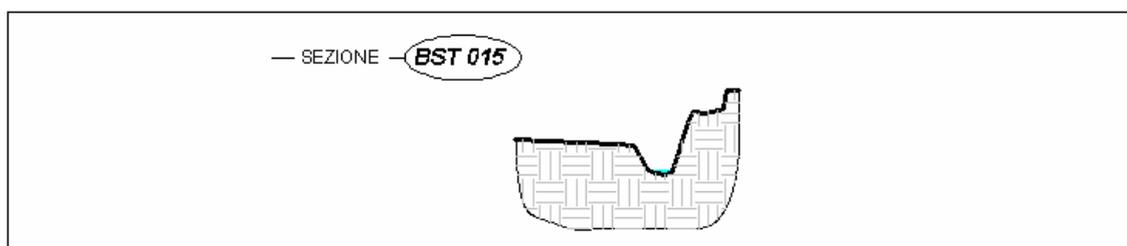


Figura 4.5. Sezione trasversale tipo del macrotratto morfologico “Alto Basento”. Rilevo 2004.

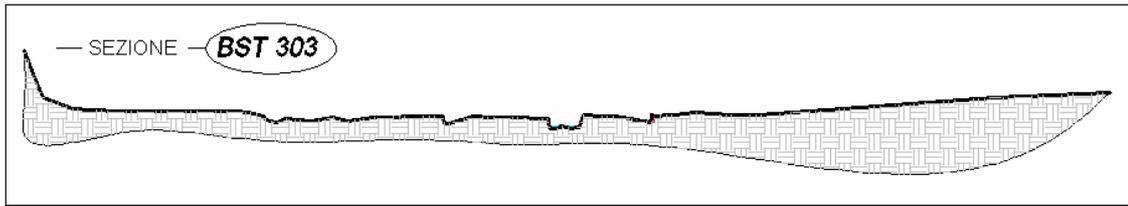


Figura 4.6. Sezione trasversale tipo del macrotratto morfologico “*Medio Basento*”. Rilevo 2004.

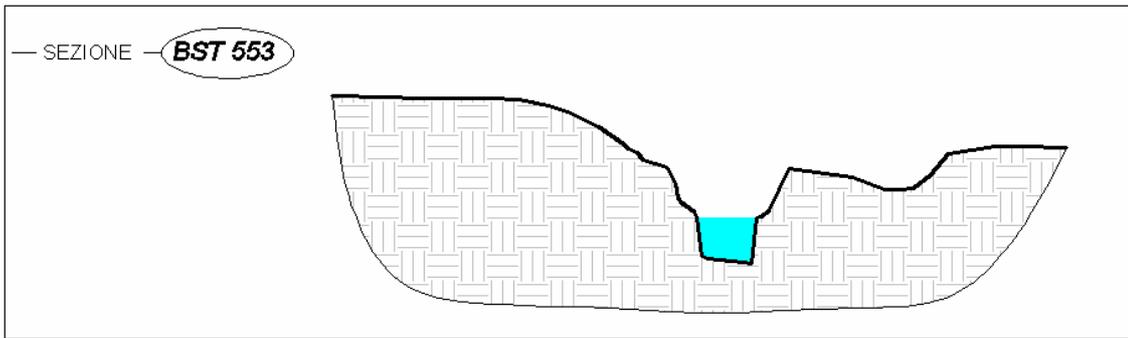


Figura 4.7. Sezione trasversale tipo del macrotratto morfologico “*Basso Basento*”. Rilevo 2004.

4.1.2. Il Basento a valle della S.S. 106 jonica

A valle della S.S: 106 Jonica il Fiume Basento scorre nei terreni pianeggianti del *Metapontino* per circa 10.2 km prima di riversarsi nel Mar Jonio.

Qui il fiume assume le tipiche caratteristiche di un alveo incassato di pianura. L'andamento planimetrico è spiccatamente meandriforme, il fondo alveo è caratterizzato da limi e sabbie e la pendenza media del fondo alveo si attesta intorno allo 0.3‰. La sezione trasversale ha una larghezza in superficie w (*top width*) di circa 20 m, una profondità h (*depth*) tra 4 e 5 m e un *entrenchment ratio* intorno a 4 – 5 (*Rosgen, D., Applied River Morphology, 1996*).

A titolo di esempio si riporta, nella figura seguente, una sezione trasversale caratteristica del F. Basento nel tratto in esame.

di apprezzabili modifiche morfologiche dell'alveo negli ultimi 60 anni. Confrontando, infatti, la cartografia dell'I.G.M.I. in scala 1:50000 del 1956 con le ortofotocarte in scala 1:5000 del 2004 è possibile rinvenire una totale invarianza dell'assetto planimetrico del fiume. Nella figura seguente il *thalweg* originario e quello attuale sono identificati rispettivamente con il colore celeste e blu.

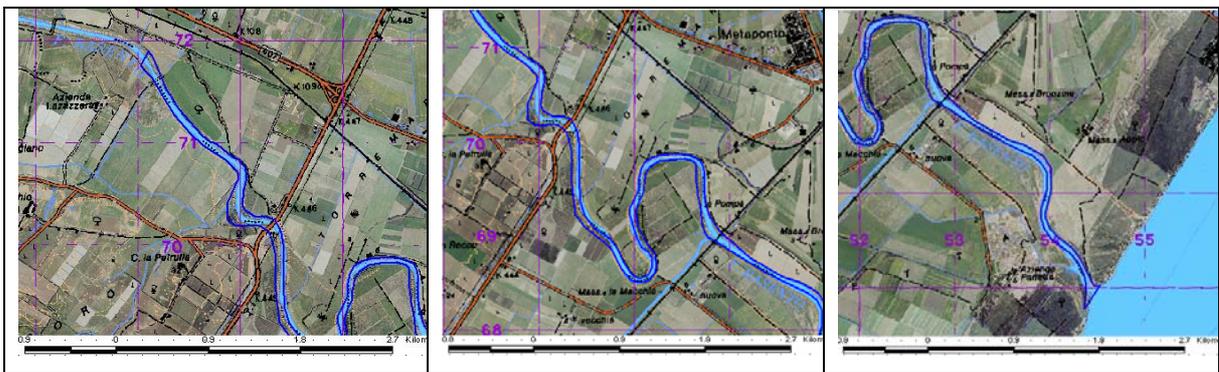


Figura 4.10. Sovrapposizione tra la carta dell'I.G.M.I. in scala 1:25000 del 1956 (in trasparenza) e le ortofotocarte in scala 1:5000 del 2004 per il tratto fluviale del Basento in esame: a monte della S.S. 106 jonica (a sinistra), tra gli attraversamenti della S.S. 106 jonica e ferroviario (al centro) e tra la linea ferroviaria Taranto Reggio Calabria e la foce (a destra).

L'analisi morfologica della foce del Fiume Basento è stata realizzata ricorrendo, oltre che alle informazioni derivanti dal rilievo topografico del 2004, anche (e soprattutto) al DTM (*Digital Terrain Model*) di dettaglio ottenuto a partire dal rilievo laser-scan della costa jonica descritto successivamente. Le informazioni così acquisite hanno giustificato l'applicazione dei moderni e sofisticati modelli matematici bidimensionali per la determinazione delle aree inondabili.

4.2. IL FIUME BRADANO

Il fiume Bradano nasce, in prossimità dell'abitato di Monte Marcone, dalla confluenza del torrente Bradanello con fossi e torrenti che scendono dalle pendici del monte Carmine di Avigliano e la Torretta. L'asta principale è lunga circa 170 km ed il bacino idrografico ha una superficie complessiva di circa 2960 km², confinando con il bacino del fiume Basento a sud e comprendente a nord una zona della Puglia ricadente nelle province di Taranto e Bari.

Il reticolo idrografico è piuttosto ramificato e i maggiori affluenti si trovano in destra idrografica (la Fiumara di Tolve, il Torrente Bilioso, il Torrente Rosso). In sinistra

scorrono, invece, La Fiumarella, il Torrente Percopo, il Torrente Basentello, il Torrente Fiumicello ed il Torrente Gravina.

Il Bradano, nonostante abbia il bacino con la più grande estensione, è caratterizzato da una portata media annua alla foce di 7 m³/s. Ciò a causa sia delle precipitazioni che sono le più basse della regione sia della predominanza dei terreni poco permeabili e della conseguente povertà degli apporti sorgentizi.

Il bacino del F. Bradano ospita diversi invasi: di Genzano sul T. Fiumarella, del Basentello sul T. Basentello e di Aderenza e di S. Giuliano sull'asta principale del F. Bradano.

4.2.1. La morfologia dell'asta principale del Fiume Bradano

Il Bradano presenta una morfologia caratterizzata da zone collinari (Alto e Medio Bradano) e pianeggianti nella parte terminale (Basso Bradano).

Anche in questo caso, come per il Fiume Basento, una prima valutazione dei caratteri morfologici dell'asta principale è stata realizzata facendo riferimento al rilievo eseguito per conto dell'AdB di Basilicata nel 2004 contenente:

- i rilievi topografici delle sezioni trasversali (397) dell'asta principale e delle relative strutture idrauliche e di attraversamento;
- i risultati della campagna di rilievo delle caratteristiche granulometriche del fondo alveo;
- le ortofotocarte in formato digitale raster in scala 1:5000, di una fascia comprendente il fiume per una ampiezza di circa 2 km, i relativi punti quotati e le isoipse in formato vettoriale generate dal modello digitale del terreno.

Analizzando la pendenza del fondo alveo, la geometria delle sezioni trasversali, le curve granulometriche e l'assetto planimetrico del corso d'acqua è stato possibile individuare i tre macrotratti morfologici sotto schematizzati.

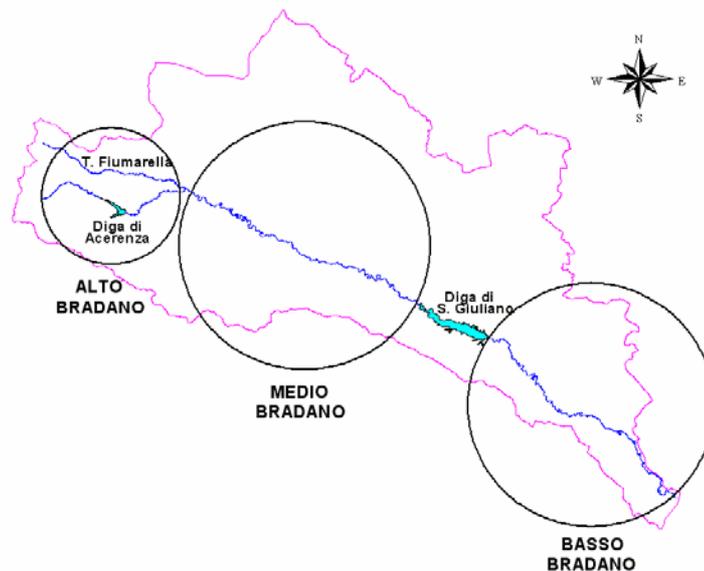


Figura 4.11. Suddivisione morfologica del Fiume Bradano

Tratto morfologico	Limite di monte	Limite di valle
Alto Bradano	Sorgente	Confluenza T.Fiumarella (BRD011)
Medio Bradano	Confluenza T.Fiumarella (BRD011)	Diga di S.Giuliano (BRD076)
Basso Bradano	Diga di S.Giuliano (BRD301)	foce (BRD397)

Tabella 4.2. Individuazione dei limiti di monte e di valle dei macrotratti morfologici dell'asta principale del Fiume Bradano. Con BRD000 si indica la sezione topografica rilevata nel 2004.

Il primo tratto del corso d'acqua (*Alto Bradano*) va dalla sorgente alla confluenza con il Torrente Fiumarella. La sua caratterizzazione è stata eseguita facendo riferimento al solo tronco posto a valle dell'invaso di Acerenza dal momento che il rilievo topografico interessa solo l'asta principale a valle di tale diga: qui la pendenza assume un valore medio pari all'1 %. A valle di tale invaso il corso d'acqua lambisce, in sinistra idrografica, il territorio di Acerenza e, in destra, quello di Oppido Lucano; mentre più a valle riceve, in sinistra idrografica, le acque del Torrente Fiumarella.

A valle di tale confluenza e fino alla diga di S. Giuliano si sviluppa il *Medio Bradano* che ha un andamento planimetrico tipicamente meandriforme. Qui riceve le acque della la Fiumara di Tolve, in località Ischia della Madonna, del Torrente Percopo e del Torrente Bilioso. In questo secondo tratto la pendenza media del fondo alveo è di circa 0.4%.

Il terzo tratto (*Basso Bradano*) si estende tra la diga di S. Giuliano e la foce. Qui la pendenza media può ritenersi pari a 0.1%. Il tratto è caratterizzato da una forra profonda, con le pareti a picco, dal tipico aspetto delle *gravine pugliesi*, incise dalle acque del Bradano nelle formazioni calcaree tufacee del Pliocene inferiore e, al di sotto, nei calcari del Cretacico., tale conformazione si mantiene per circa 5 km.

<p>Alto Bradano</p> <p>tratti con pendenza maggiore dello 0.1%, ampiezza delle sezioni da 25 a 130 m, fondo alveo caratterizzato da ghiaia con ciottoli.</p>	
<p>Medio Bradano</p> <p>tratti con pendenza di 0.4%, ampiezza delle sezioni da 18 a 640 m.</p>	
<p>Basso Bradano</p> <p>tratti con pendenza di 0.1%, ampiezza delle sezioni da 6.0 a 740 m.</p>	

Figura 4.12. Suddivisione dell'asta principale del Fiume Bradano con sintesi delle principali caratteristiche morfologiche (a sinistra) e stralci planimetrici da ortofotocarta (a destra).

- SEZIONE - BRD 004

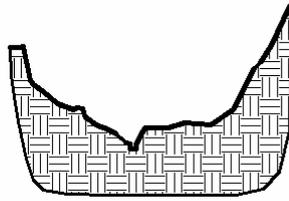


Figura 4.13. Sezione trasversale tipo del macrotratto morfologico “Alto Bradano”. Rilevo 2004.

- SEZIONE - BRD 032

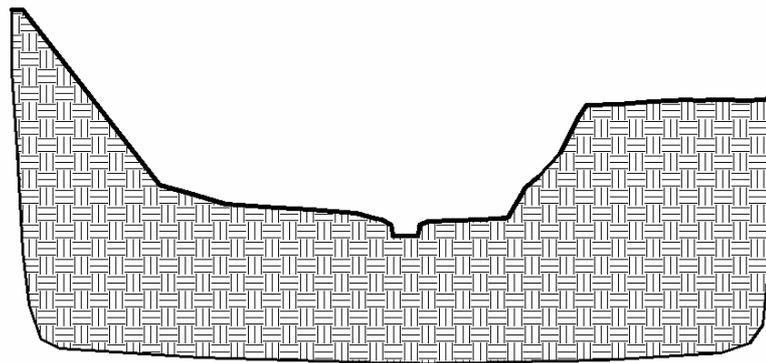


Figura 4.14. Sezione trasversale tipo del macrotratto morfologico “Medio Bradano”. Rilevo 2004.

- SEZIONE - BRD 338

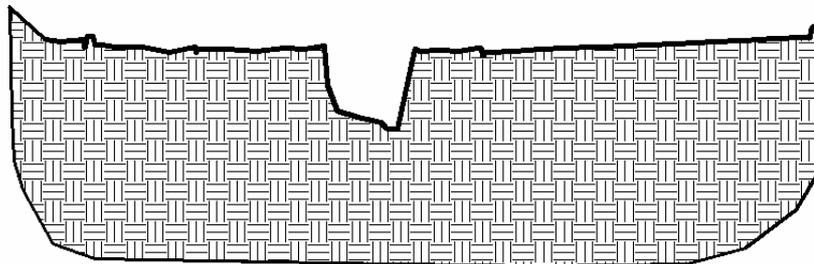


Figura 4.15. Sezione trasversale tipo del macrotratto morfologico “Basso Bradano”. Rilevo 2004.

4.2.2. Il Bradano a valle della s.s. 106 jonica

A valle della S.S: 106 Jonica il Fiume Bradano percorre circa 6.5 km prima di riversarsi nel Mar Jonio, in questo tratto il fiume assume le tipiche caratteristiche di un alveo incassato di pianura. L'andamento planimetrico è spiccatamente meandriforme, il fondo alveo è caratterizzato da limi e sabbie e la pendenza media del fondo alveo si attesta intorno allo 0.4‰. La sezione trasversale ha una larghezza in superficie w (*top width*) di circa 10 m, una profondità h (*depth*) di circa

Confrontando la cartografia dell'I.G.M.I. in scala 1:25000 del 1956 con le ortofotocarte in scala 1:5000 del 2004 è possibile rinvenire una totale invarianza dell'assetto planimetrico del fiume a monte della S.S: 106 Jonica e a valle dell'attraversamento ferroviario. Nel tratto compreso tra i due attraversamenti, invece, l'originario *thalweg* appare più meandrizzato rispetto a quello attuale come mostra la figura seguente il cui il vecchio e l'attuale alveo sono identificati rispettivamente con il colore celeste e blu.

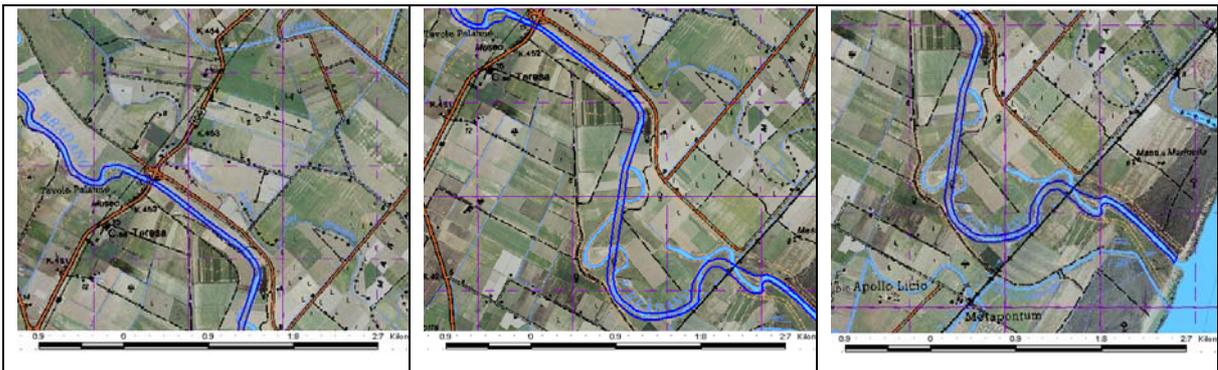


Figura 4.18. Sovrapposizione tra la carta dell'I.G.M.I. in scala 1:25000 del 1956 (in trasparenza) e le ortofotocarte in scala 1:5000 del 2004 per il tratto fluviale del Bradano in esame: a monte della S.S. 106 jonica (a sinistra), tra gli attraversamenti della S.S. 106 jonica e ferroviario (al centro) e tra la linea ferroviaria Taranto Regio Calabria e la foce (a destra).

Anche per la foce del Fiume Bradano il contributo del DTM (*Digital Terrain Model*) di dettaglio ottenuto a partire dal rilievo laser-scan si è dimostrato un valido supporto per la caratterizzazione morfologica e per l'applicazione dei modelli matematici bidimensionali.

5. METODI SPEDITIVI PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE AREE ESPOSTE A RISCHIO DI INONDAZIONE

Una prima analisi del rischio di inondazione dell'area di studio, è stata condotta attraverso l'applicazione di un metodo speditivo. In generale i metodi speditivi derivano da ipotesi semplificate sull'osservazione del fenomeno e possono essere classificati, sinteticamente in

- *metodo topografico*, che si basa sul confronto tra le quote idriche nel corso d'acqua, in condizioni di moto permanente, e le quote topografiche delle aree circostanti. Le aree ritenute inondabili sono quelle caratterizzate da una quota inferiore a quella della superficie idrica;
- *metodo topologico*, in cui le aree inondabili sono definite in riferimento alla prima sezione fluviale a partire da monte in cui il livello idrico, in moto permanente, comincia ad esondare. Nel dettaglio tali aree inondabili sono rappresentate da quelle aree con quota inferiore alla quota del terreno in corrispondenza della sezione di riferimento di monte;
- *metodo volumetrico*, condizionato sia dal profilo di corrente in moto permanente sia dall'idrogramma di piena. Ipotizzando che la differenza tra la portata in arrivo da monte in una certa sezione fluviale e le massime portate contenibili nell'alveo, integrata nel tempo, sia il volume che esonda e si accumula nelle aree circostanti, le aree inondabili sono definite in base al loro riempimento con tale volume. Tale procedimento va effettuato per ciascuna sezione del tratto fluviale in esame;
- *metodi DEM-Based*, basati sul presupposto che le aree inondabili siano naturalmente descritte mediante l'utilizzo di un DEM a seguito degli effetti cumulati dovuti agli eventi di piena realizzatisi nelle valli della superficie topografica.

Recenti studi (*Manfreda et al., 2007*) hanno evidenziato la possibilità di correlare il pericolo di inondazione ad alcune grandezze geomorfologiche. Nel presente studio si è approfondita tale applicazione, individuando legami diversi tra il pericolo di inondazione e tali grandezze, in funzione della morfologia fluviale analizzata (*Giuzio, 2007 Utilizzo di tecniche GIS per la delineazione di aree di inondazione: approfondimento sullo sviluppo di un metodo geomorfologico applicato al bacino*

del Fiume Basento). Nello specifico e in riferimento proprio ad uno dei due corsi d'acqua studiati nel presente lavoro, il Fiume Basento, tali studi hanno evidenziato una netta differenza di comportamento dei tratti Alto e Medio Basento da quello definito Basso Basento che attraversa la piana costiera.

Con l'ausilio di un metodo DEM-Based, il pericolo di inondazione è stato confrontato con le caratteristiche Slope, Aspect, Curvature, e Hillshade desunte da un DEM dell'area di studio, avente risoluzione 90 m e ancora con l'*Indice Topografico IT* (Kirkby 1975) e con la proposta di un *Indice Topografico Modificato ITm* (Manfreda et al., 2006) definiti come segue:

$$IT = \ln\left(\frac{A_d}{\tan \beta}\right) \quad (5.1)$$

A_d = area drenata per unità di larghezza

$\tan(\beta)$ = pendenza locale

$$ITm = \ln\left(\frac{(A_d)^n}{\tan \beta}\right) \quad (5.2)$$

A_d^n = ampiezza dell'area inondata in una data sezione.

È utile sottolineare che la variabile A_d^n che compare nell'espressione dell'*ITm*, può interpretarsi come rappresentativa dell'ampiezza dell'area inondata in una data sezione, visto il legame correlativo, ben espresso da una legge di potenza, esistente tra questa e l'area drenata (Manfreda et al., 2006). Tale legame è stato indagato in numerosi bacini riscontrando un legame espresso da una legge di potenza con esponente n , compreso tra 0.18 e 0.35 (Nardi et al., 2006).

Per quel che riguarda il pericolo di inondazione si è fatto riferimento, secondo quanto contenuto nel PAI Basilicata, a quattro differenti livelli:

- pericolo nullo;
- periodo di ritorno dell' evento $T_R=500$ anni;
- periodo di ritorno dell' evento $T_R =200$ anni;
- periodo di ritorno dell' evento $T_R =30$ anni.

Analizzando le distribuzioni di probabilità delle caratteristiche geomorfologiche condizionate al livello di pericolosità individuato dal Piano stralcio dell'Autorità di Bacino, le grandezze che mostrano la maggiore dipendenza rispetto al pericolo di

inondazione sono la pendenza, l'Indice Topografico *IT* e l'Indice Topografico Modificato *ITm*.

È possibile altresì individuare differenze di legame in funzione della morfologia. Nel tratto morfologico definito Alto Basento, alveo di tipo inciso, il rischio di allagamento è correlato sia alla pendenza, che all'indice topografico modificato, il quale, come è noto, funziona meglio in aree dalla orografia più marcata rispetto a quelle estremamente pianeggianti, dove, inevitabilmente, l'indice tende a valori più alti.

Dalle valutazioni effettuate, sintetizzate nelle Figure 5.1, 5.2 e 5.3. è possibile ricavare che:

- per l'Alto Basento, il rischio di allagamento influenzato esclusivamente dall'Indice Topografico *IT* e dalla pendenza. La dipendenza dall'*IT*, tuttavia, appare maggiore della dipendenza dalla pendenza;
- per il Medio Basento, la pendenza e l'Indice Topografico *IT* continuano ad essere le sole caratteristiche geomorfologiche ad influenzare il rischio di allagamento. Qui, però, si osserva una dipendenza maggiore dalla pendenza;
- per il Basso Basento, infine, non è stato possibile rinvenire alcune legame tra l'Indice Topografico *IT* e le caratteristiche geomorfologiche considerate.

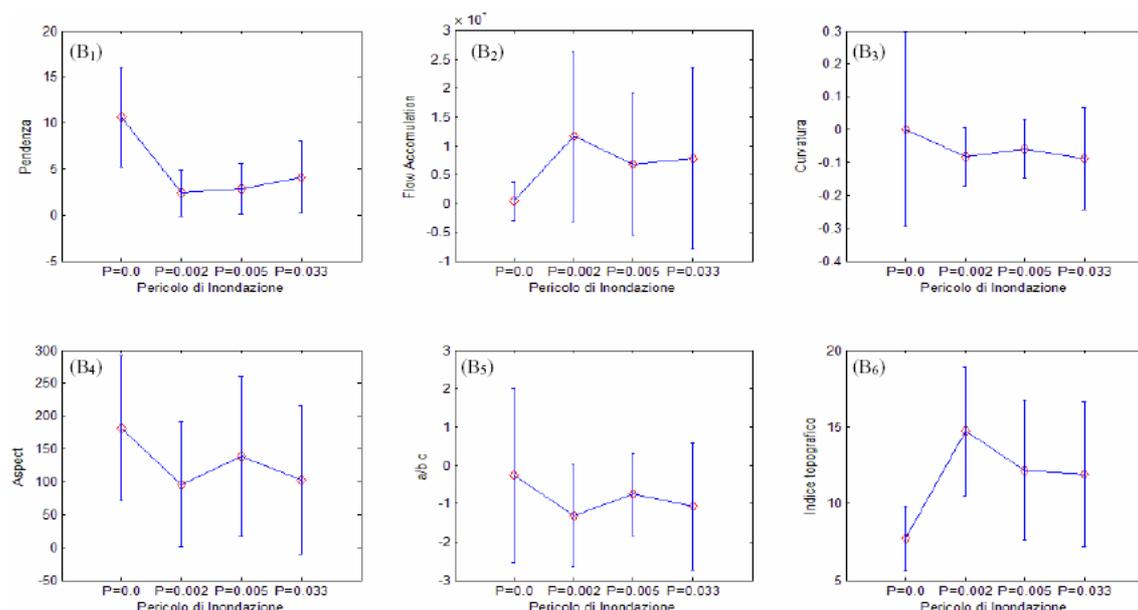


Figura 5.1. Alto Basento. Dipendenza tra le diverse grandezze geomorfologiche e il pericolo di inondazione secondo il Piano stralcio dell'Autorità di bacino della Basilicata.

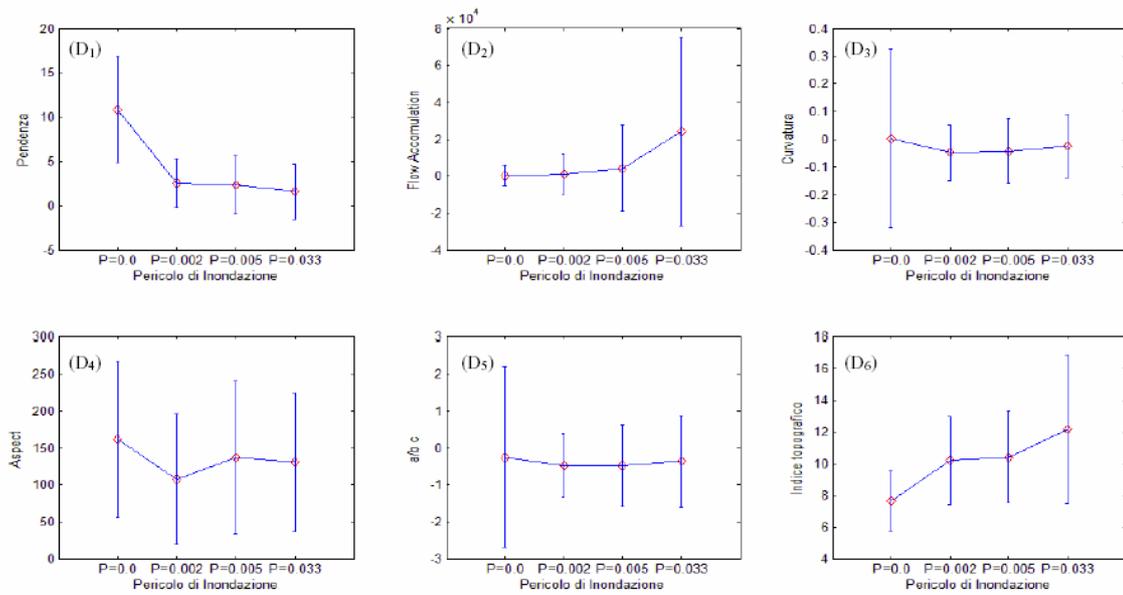


Figura 5.2. Medio Basento. Dipendenza tra le diverse grandezze geomorfologiche e il pericolo di inondazione secondo il Piano stralcio dell’Autorità di bacino della Basilicata.

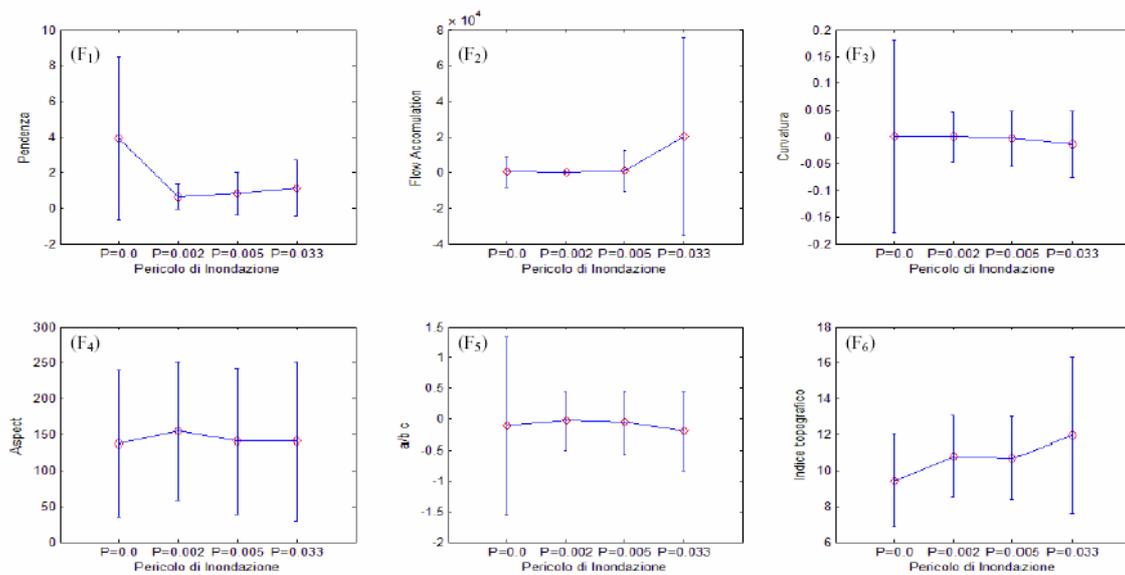


Figura 5.3. Basso Basento. Dipendenza tra le diverse grandezze geomorfologiche e il pericolo di inondazione secondo il Piano stralcio dell’Autorità di bacino della Basilicata.

5.1. L'INDICE TOPOGRAFICO MODIFICATO

In riferimento all'Indice Topografico modificato IT_m , inoltre, si è proceduto ad individuare il valore dell'esponente n dell'area contribuente che compare nella (5.2) che minimizza sia l'errore nella stima delle aree allagabili sia l'errore di sovrastima lungo i tre macrotratti morfologici del Fiume Basento. Considerando un intervallo di variazione di n compreso tra 0.1 e 0.5 e le due funzioni di errore (*Manfreda et al., 2006*) definite di seguito:

$$ER1 = \frac{\text{Aree_allagabili_con_IT} \leq IT_s}{\text{Aree_allagabili_PAI}} \times 100 \quad (5.3)$$

$$ER2 = \frac{\text{Aree_non_allagabili_con_IT} \geq IT_s}{\text{Aree_non_allagabili_PAI}} \times 100 \quad (5.4)$$

in cui $ER1$ definisce l'errore percentuale relativo alla corretta individuazione delle aree allagabili, mentre $ER2$ rappresenta l'errore dovuto alla sovrastima del metodo, di sono ottenuti i seguenti valori:

- $n = 0.3$ per l'Alto Basento con valore soglia IT_s pari a 0.25;
- $n = 0.2$ per il Medio Basento con valore soglia IT_s pari a 0.25;
- per il Basso Basento, infine, l'errore totale calcolato risulta notevolmente elevato e tra questi quello minore si ha per $n = 0.2$ con un valore soglia 1.50.

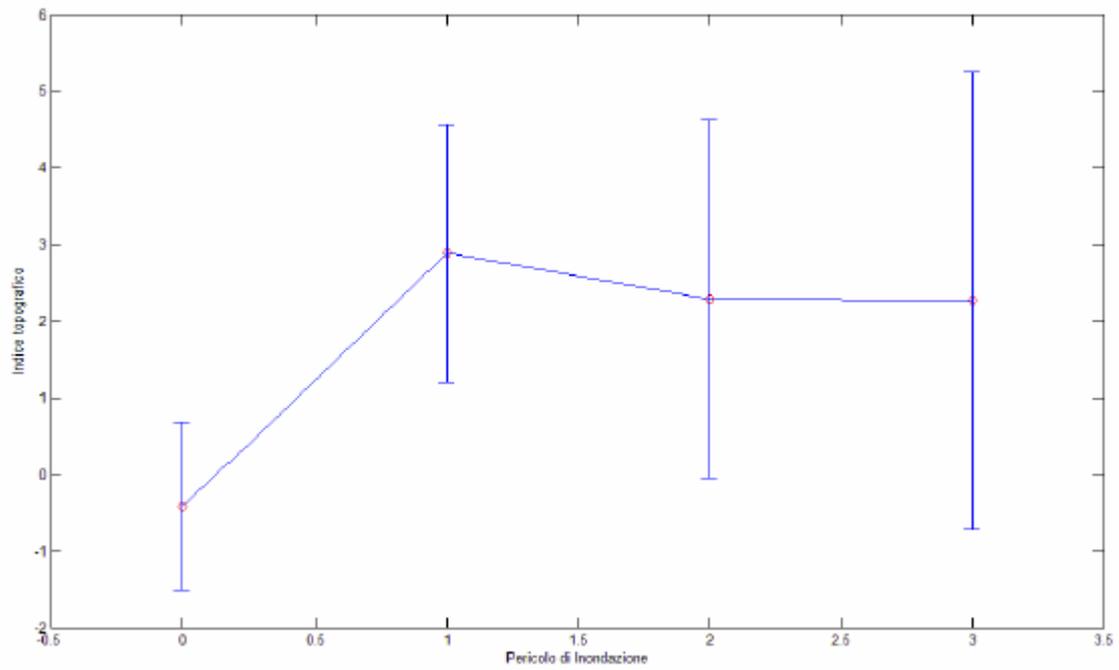


Figura 5.4. Legame tra l'indice topografico modificato *ITm* e il pericolo di inondazione secondo il PAI Basilicata. Tratto morfologico Alto Basento. $n = 0.3$.

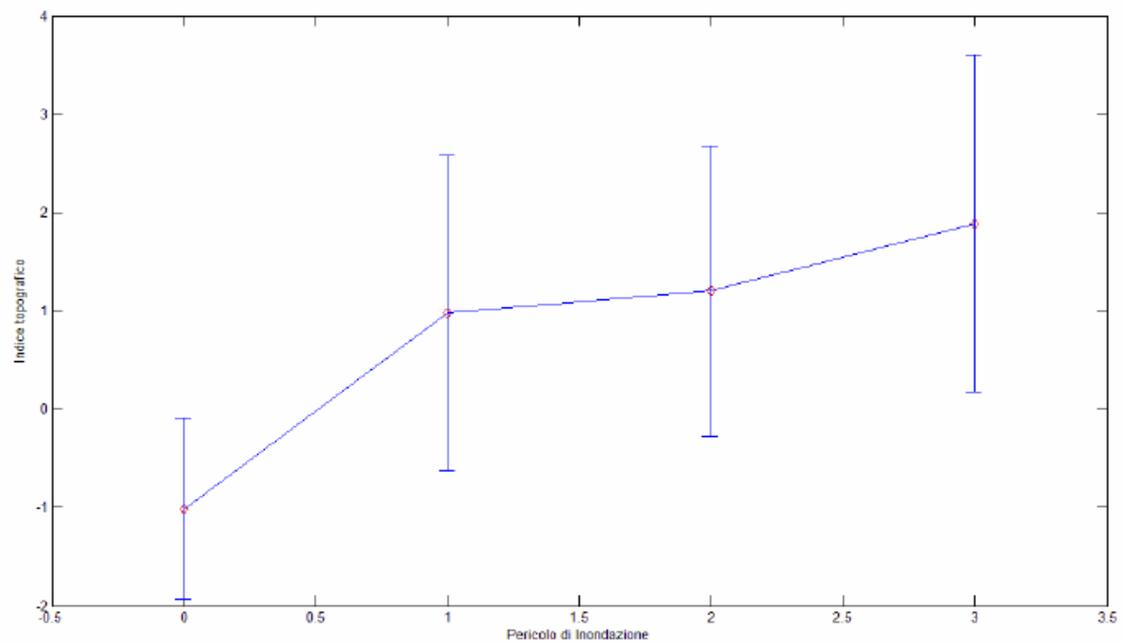


Figura 5.5. Legame tra l'indice topografico modificato *ITm* e il pericolo di inondazione secondo il PAI Basilicata. Tratto morfologico Medio Basento. $n = 0.2$.

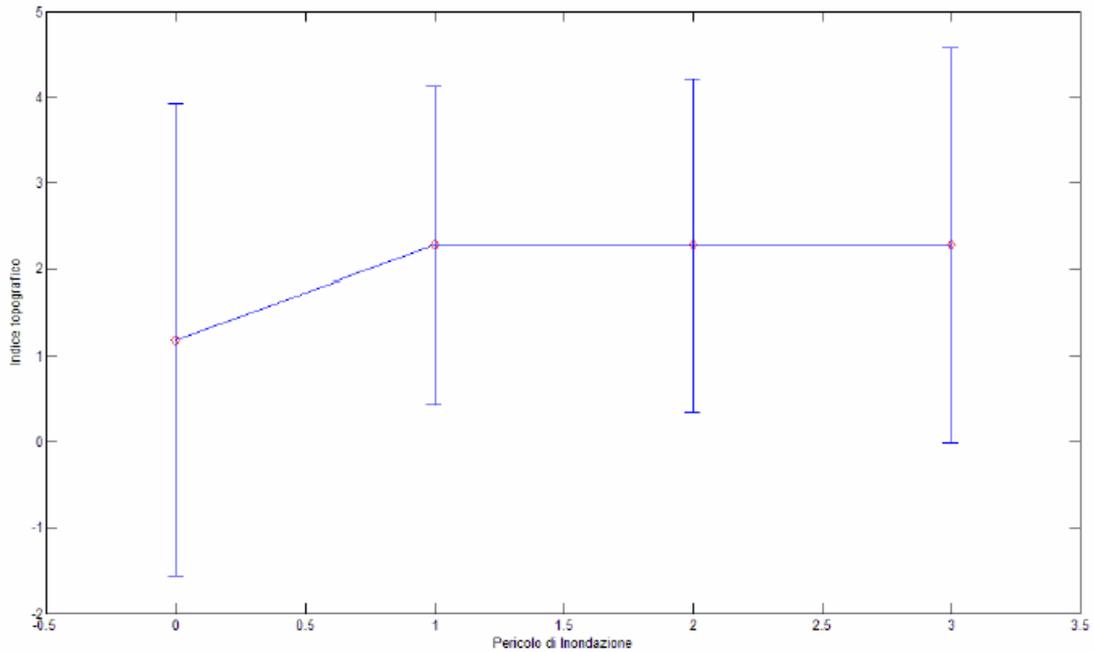


Figura 5.6. Legame tra l'indice topografico modificato *ITm* e il pericolo di inondazione secondo il PAI Basilicata. Tratto morfologico Basso Basento. $n = 0.2$.

L'analisi descritta nel presente capitolo evidenzia come, in corrispondenza del Basso Basento, non si riesca a cogliere nessun legame tra le grandezze geomorfologiche considerate e il pericolo di inondazione. Questo sia perché le pendenze sono molto basse sia perché, come già osservato, l'*ITm* non è un buon strumento per la valutazione del pericolo di inondazione lungo aree estremamente pianeggianti, quale l'area oggetto di studio (Giuzio, 2007, *Utilizzo di tecniche GIS per la delimitazione di aree di inondazione. Approfondimenti sullo sviluppo di un metodo geomorfologico applicato al bacino del Fiume Basento*).

Alla luce dei risultati ottenuti attraverso l'uso del metodo speditivo descritto, si desume come la specificità delle aree che insistono nel Basso Basento imponga una valutazione basata su rilievi di dettaglio capaci di descrivere accuratamente la morfologia della zona.

6. LA VULNERABILITA' IDRAULICA NEI TRATTI VALLIVI DEI FIUMI BASENTO E BRADANO

I tratti vallivi dei fiumi Basento e Bradano possono ragionevolmente considerarsi aree a rischio di inondazione.

Questa constatazione deriva innanzitutto dalle informazioni storiche che, attraverso strade diverse, sono giunte fino ai nostri giorni. Infatti, la storia, assieme alla geomorfologia all'idrologia e alla meteorologia, contribuisce in maniera significativa alla identificazione delle aree idraulicamente vulnerabili e spesso rappresenta l'unico strumento utilizzabile per verificare teorie e modelli.

Come detto nell'introduzione, la raccolta più importante di informazioni storiche sui disastri idrogeologici (frane e alluvioni) verificatisi su tutto il territorio nazionale nel periodo 1918-2001 è stata realizzata nell'ambito del progetto AVI (*Aree Vulnerate Italiane*) dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) su incarico del Dipartimento della Protezione Civile. Il censimento è stato realizzato consultando quotidiani locali, pubblicazioni tecniche e scientifiche ed effettuando interviste ad esperti nel settore dei movimenti franosi e delle inondazioni. Tutte le notizie censite compongono un complesso archivio digitale contenente oltre 31.500 informazioni relative a frane ed oltre 8500 informazioni relative ad inondazioni. Tale archivio è consultabile all'indirizzo Internet <http://sici.irpi.cnr.it>.

Si riporta, nella Figura 6.1, uno stralcio della *Carta della densità degli eventi di piena* redatta dal GNDCI – CNR nell'ambito del progetto AVI: da tale immagine è possibile notare come, lungo la costa jonica lucana, sia proprio il territorio in corrispondenza delle foci del Basento e del Bradano ad essere stato interessato in passato da un maggior numero di eventi calamitosi.

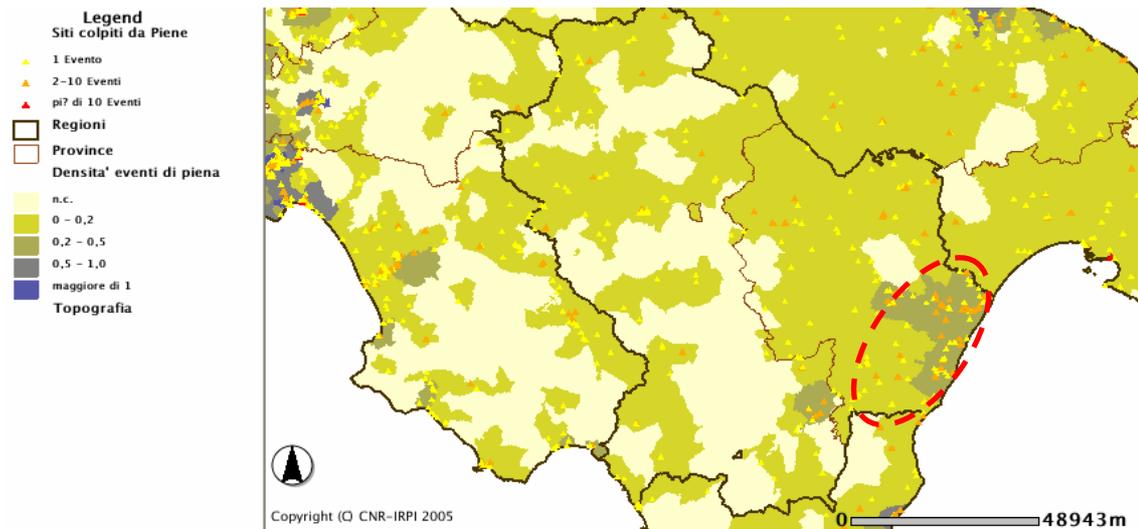


Figura 6.1. Stralcio della *Carta della densità degli eventi di piena*. I triangoli indicano gli eventi calamitosi (giallo = 1 evento, arancio = da 2 a 10 eventi, rosso = più di 10 eventi) mentre le aree con colori dal bianco (densità più bassa) al blu (densità più alta) indicano i diversi livelli di densità. Sistema informativo sulle catastrofi idrogeologiche. AVI – GNDICI. Il cerchio rosso, infine, indica la costa jonica.

Inoltre, per sottolineare ulteriormente la particolare vulnerabilità idraulica delle foci del Basento e del Bradano (giustificando in un certo senso anche la scelta di queste due foci come area di studio) si riporta quanto raccolto dall'ARPAB (*Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente di Basilicata*, <http://www.settoreimpc.it/idrometeorologico/alluv-met.asp>) per due dei più significativi eventi di piena verificatesi lungo la costa jonica nell'ultimo secolo: quello dell'ottobre 1959 e quello, più recente, del novembre 2004.



Foto 6.1. Alluvione del 24.10.1959 lungo il Fiume Basento in corrispondenza dell'attraversamento della S.S. 106 jonica.

Dell'evento del 1959 si dispone solo di alcune immagini fotografiche (Foto 6.1) e di informazioni sui danni prodotti. Si legge sui giornali dell'epoca di ingenti danni alle opere civili, crolli di strutture viarie importanti sulla S.S. 106 e di un elevato numero di sfollati nei comuni limitrofi. Nel centro di Scanzano Jonico, in particolare, l'acqua raggiunse anche il metro di altezza.

Il più recente fenomeno del novembre 2004 è considerato come uno dei più critici nell'ultimo secolo dal momento che, in appena due ore, ha fatto registrare ben 120 mm di pioggia. Dal grafico di Figura 6.2, che mostra sia l'andamento temporale della pioggia in località *Metaponto a S.S. 106* (in mm) che l'andamento del livello del *Fiume Basento* nella stessa località (in corrispondenza della Strada Statale n° 106), si leggono un livello massimo del fiume pari a 5,79 m e un valore della pioggia cumulata di 235 mm durante l'evento.

Per meglio comprendere la particolare gravità dell'evento del 2004 si ricorda che, nell'area del *metapontino* mediamente nel corso di un anno cadono circa 500 mm di pioggia in totale. Questo valore confrontato con i 235 mm di pioggia caduti in circa 33 ore nella stazione di *Metaponto a S.S. 106*, testimonia la particolare intensità del fenomeno alluvionale.

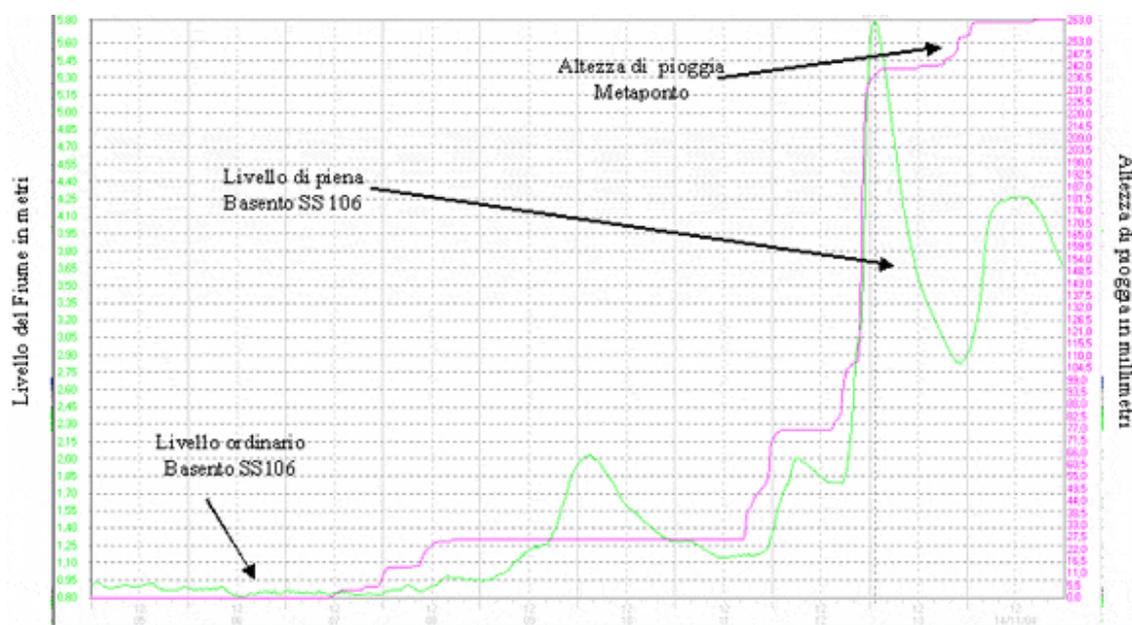


Figura 6.2. Andamento temporale della pioggia (in rosa) e del livello idrico del Fiume Basento (in verde) in località Metaponto a S.S. 106. Dati del Servizio Idrografico e Mareografico del Settore I.M.P.C. dell'ARPAB.

7. I MODERNI SISTEMI DI ACQUISIZIONI IN CONTINUO PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA E MORFOLOGICA

La probabilità che un'area possa essere interessata da un evento alluvionale è connessa non solo al corso d'acqua e quindi alla sua incapacità di contenere l'onda di piena, ma anche alle direzioni di deflusso delle acque quando queste hanno abbandonato il fiume.

Pertanto la morfologia del territorio riveste un ruolo di grande importanza in quanto la propagazione dei flussi è influenzata dalle caratteristiche di direzione e di pendenza del terreno.

Per le zone particolarmente pianeggianti, come quella in esame, le modeste differenze altimetriche rendono difficile identificare tutti gli elementi significativi presenti sulla superficie se non si possiedono informazioni di estremo dettaglio.

La costruzione di un modello digitale del terreno è, perciò, fondamentale perché consente di definire l'aspetto superficiale dell'area, la presenza di depressioni, di elementi di ostacolo al deflusso di piena (rilevati stradali, argini, ...) ed elementi che favoriscono la propagazione delle piene (canali di bonifica, strade, ...).

Per quel che riguarda le foci del Basento e del Bradano si dispone di un dettagliato rilievo laser integrato da fotogrammetria digitale eseguito su tutta la costa jonica dalla società GEOCART s.r.l. per conto dell'AdB nel 2006 che va ad aggiungersi alle informazioni derivanti dai rilievi delle aste principali del Basento e del Bradano di cui si è già scritto consistenti in:

- rilievi topografici delle sezioni trasversali dell'asta principale e delle relative strutture idrauliche e di attraversamento;
- curve granulometriche del fondo alveo e la relativa ubicazione in formato digitale;
- ortofotocarte in formato digitale raster in scala 1:5000, di una fascia comprendente il fiume per una ampiezza di circa 2 km;
- profili longitudinali delle arginature e relativa ubicazione in formato digitale.
- rilievo delle opere idrauliche longitudinali e trasversali.

7.1. FOTOGRAMMETRICA DIGITALE E PRODUZIONE DI ORTOFOTO

La fotogrammetria digitale, che ha subito negli ultimi venti anni un considerevole sviluppo, è oggi solitamente integrata al sistema di scansione laser.

Il passaggio dalla fotogrammetria analitica a quella digitale è sicuramente legato ai notevoli progressi del settore informatico, sia per quanto riguarda la parte hardware che quella software. Tali progressi hanno consentito, infatti, una elevata automazione del processo fotogrammetrico: in particolare oggi è possibile eseguire in modalità automatica le procedure di orientamento e estrazione di modelli digitali delle altezze (DEM).

Le componenti fondamentali del sistema sono l'unità di acquisizione dell'immagine digitale (scanner e camere digitali) ed i componenti che definiscono le stazioni digitali. Le funzioni fondamentali, invece, possono essere sintetizzate in: importazione di immagini digitali in vari formati, esecuzione dell'orientamento interno ed esterno (in maniera manuale e/o automatica), ricampionamento equipolare delle immagini, estrazione automatica del DEM (*Digital Elevation Model*), restituzione stereoscopica vettoriale ed, infine, produzione di ortofoto digitali.

Il passaggio dai fotogrammi analogici a quelli digitali avviene mediante l'operazione di scansione. Gli scanner fotogrammetrici utilizzati garantiscono un'assenza quasi totale di alterazioni nelle informazioni geometriche dei fotogrammi originali così da evitare errori nell'immagine prodotta (distorsioni geometriche) tali da influenzare le successive operazioni fotogrammetriche.

Schematicamente l'efficacia di un tale strumento è garantita dalle seguenti caratteristiche: elevato valore della risoluzione geometrica di acquisizione (fino a 4000 dpi), alto valore dell'accuratezza geometrica; elevate qualità radiometriche (la risoluzione radiometrica dovrebbe essere compresa tra 8 e 32 bit), tempi di scansione ridotti (tra 5 e 30 minuti) e possibilità di acquisire direttamente dai negativi e dalle diapositive.

Le coordinate planimetriche dei punti fotografici vengono definite attraverso l'uso di un singolo fotogramma attraverso due tecniche definite *raddrizzamento* ed *ortoproiezione*. La prima consente di trasformare la fotografia di un oggetto piano in una proiezione ortogonale. La seconda, detta anche *raddrizzamento*

differenziale, trasforma la fotografia di un oggetto qualunque nella sua proiezione ortogonale considerando, però, di conoscere l'andamento altimetrico dell'oggetto stesso.

L'uso di immagini digitali consente di ottenere in modo rapido e semplice immagini raddrizzate e ortoproiettate. Il raddrizzamento digitale avviene secondo le seguenti fasi:

- calcolo dei parametri dell'omografia che consente di passare dalle coordinate oggetto alle coordinate immagine;
- scomposizione dell'area compresa tra i quattro punti di appoggio in una griglia a maglie quadrate di dimensione pari al pixel dell'immagine che si vuole generare. Di ogni pixel sono note le coordinate del baricentro;
- trasformazione nel sistema immagine delle coordinate dei baricentri dei pixel attraverso i parametri dell'omografia. Si determinano, così, i numeri di riga e di colonna corrispondenti sull'immagine di partenza;
- assegnazione del valore radiometrico letto sull'immagine originale in corrispondenza dei valori di riga e di colonna determinati al passo precedente al pixel dell'immagine raddrizzata

L'ortoproiezione digitale avviene in modo analogo lavorando, però, su un'immagine a orientamento esterno noto e su un DEM dell'oggetto. In questo caso si procede come di seguito sintetizzato:

- scomposizione dell'area dell'ortoproiezione in pixel di dimensioni opportune;
- determinazione delle coordinate del terreno x,y del baricentro del primo pixel e definizione della sua quota z mediante interpolazione sul DTM,
- prospettivazione delle coordinate x,y,z per determinare i numeri di riga e di colonna corrispondenti all'immagine originale,
- attribuzione del valore radiometrico del pixel individuato sull'immagine originale al pixel considerato sull'immagine ortoproiettate.

7.2. IL LASER SCANNING

Il laser a scansione è un metodo di rilievo che in tempi rapidi fornisce un DSM (*Digital Surface Model*) e, a seguito di elaborazioni con specifici programmi e applicando differenti algoritmi di filtro, un DTM (*Digital Terrain Model*) di buona qualità.

La scansione del territorio è realizzata da un telemetro laser posto a terra o su un velivolo attraverso un raggio elettromagnetico nell'infrarosso vicino. Il principio fisico sul quale si basa è la riflessione del raggio per effetto dell'interazione con i vari corpi che il raggio intercetta sul suo cammino: infatti, la posizione di un punto viene determinata valutando il tempo che il raggio impiega nel suo percorso di andata e ritorno alla velocità della luce:

$$t = \frac{2h}{c} \quad (7.1)$$

dove t è il tempo, h la distanza e c la velocità della luce.



Figura 7.1. Esempio di alloggiamento della strumentazione laser per elicottero.

I punti rilevati per metro quadro possono variare da un minimo di uno ad un massimo di qualche decina in funzione della quota di volo del velivolo. Tale quota, inoltre, varia da qualche centinaio di metri a qualche migliaio in dipendenza del livello di dettaglio che si vuole raggiungere e degli strumenti utilizzati.

Per effettuare il rilevamento, su un elicottero o aereo vengono installati un sensore laser, un sistema GPS (*Global Position System*), un sistema inerziale INS (*Inertial*

Navigation System), una telecamera e un computer per l'acquisizione dei dati. I vari elementi funzionano indipendentemente l'uno dall'altro ma, i dati vengono registrati con un'etichetta temporale che, in fase di post-processamento, consente la ricostruzione della traiettoria del velivolo sull'area rilevata e quindi la posizione dei vari punti rilevati.

7.2.1. L'orientamento dello strumento

I sistemi di coordinate utilizzati in questa tecnologia sono due ed entrambi relativi: il primo è il sistema di coordinate euleriano tangente all'ellissoide di riferimento nella zona in cui si effettua la navigazione, con l'asse x orientato verso il nord, l'asse y verso est e l'asse z, infine, con direzione entrante nell'ellissoide stesso. Il secondo sistema è solidale con l'aeromobile ed è un sistema di coordinate ortogonali destrorso definito dall'utente, in cui l'asse x è rivolto lungo la direzione di volo, l'asse y verso destra e l'asse z uscente verso il basso. L'integrazione delle misure realizzate dal Laser Scan con i parametri derivati dall'INS e con la posizione ottenuta epoca per epoca dal sistema GPS, permette di ottenere il cosiddetto *raw data* georeferenziato (punti sparsi in coordinate assolute). I file che contengono questi dati hanno dimensioni che vanno da centinaia di migliaia ai milioni di punti per chilometro quadrato.

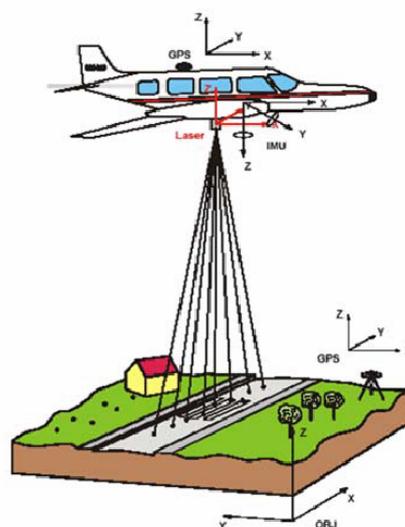


Figura 7.2. Sistemi di riferimento per l'orientamento dei sensori.

7.2.2.

Il funzionamento dei telemetri laser aviotrasportati

La scansione del territorio nasce dalla combinazione del movimento dell'aeromobile con la deflessione del raggio laser nella direzione ortogonale al movimento. La deflessione può essere effettuata con un'ottica mobile, cioè deviando il laser con specchi oscillanti o rotanti: i sistemi così equipaggiati sono molto flessibili perché è possibile modificare facilmente molti parametri di funzionamento come l'apertura angolare della scansione e il numero dei punti che la compongono. Tuttavia, in questo caso, la figura disegnata sul terreno, approssimativamente a forma di "z" per gli specchi oscillanti e ellittica per quelli rotanti, non è regolare e il movimento dell'apparato di scansione è fortemente condizionato dalle accelerazioni dell'aeromobile.

Una metodologia alternativa consiste nella duplicazione dei cammini ottici: il numero di fibre ottiche è fissato da chi produce lo strumento e lungo tali fibre ottiche il raggio laser viene periodicamente smistato per mezzo di uno specchio rotante. Questo sistema, insensibile alle sollecitazioni dinamiche, permette di disegnare una figura sul terreno estremamente regolare costituita da linee parallele leggermente inclinate rispetto alla direzione di volo lungo le quali i punti misurati sono equispaziati.

I sistemi di scansione attualmente disponibili ricorrono a segnali con frequenze nell'infrarosso vicino che hanno la proprietà di essere riflessi dal terreno. Tali frequenze vengono riflesse anche dalla vegetazione e dalle nubi, dunque gli scanner laser non possono operare in presenza di formazioni nuvolose situate tra l'aeromobile e il terreno. Tale tecnologia consente di lavorare anche al buio ed in presenza di ombre e di occlusioni prospettiche in quanto il raggio si avvicina alla nadiralità essendo l'angolo di scansione inferiore ai 20 gradi.

I segnali inviati dallo strumento sono sinusoidi modulate in ampiezza con impulsi di brevissima durata. Anche se l'impronta a terra dei raggi laser ha diametro di alcuni centimetri la bassa divergenza che li caratterizza permette di assimilarli a delle linee.

La larghezza finita dei raggi inviati può provocare riflessioni multiple. È quello che si verifica, per esempio, quando un raggio laser incontra la chioma di un albero: una parte dell'energia del segnale viene riflessa mentre, la restante, prosegue fino a terra dove anch'essa viene riflessa. La possibilità di sfruttare le riflessioni multiple

rappresenta uno dei vantaggi del sistema: nel caso, infatti, di zone boscate la probabilità che una frazione del raggio raggiunga il terreno (consentendo di determinarne la quota) è alquanto elevata.

Le riflessioni multiple di uno stesso oggetto, arrivando al ricevitore in tempi differenti, possono essere discriminate. Esistono ricevitori capaci di memorizzare fino a quattro echi diversi, mentre altri si limitano a registrare solo il primo (*First Pulse Mode*) e l'ultimo eco (*Last Pulse Mode*). E' consuetudine registrare solamente il primo eco qualora si voglia la definizione di un DSM (*Digital Surface Model*), ovvero di una superficie di convoluzione di tutti gli elementi presenti nell'area rilevata, vale a dire una superficie del terreno compresi vegetazione ed edifici. Se, invece, si vuole ottenere un DTM (*Digital Terrain Model*) che rappresenti la superficie del terreno priva di ogni altro elemento verrà registrato l'ultimo eco. Per le valutazioni idrauliche che mirano alla definizione delle aree inondabili il rilevamento della vegetazione e degli elementi presenti sul terreno (naturali o antropici) è fondamentale perché essi influenzano sia la scabrezza sia le direzioni di flusso della corrente idrica.

Recentemente sono stati immessi sul mercato dei sensori *Full Waveform* capaci di memorizzare l'intera onda di risposta del singolo raggio laser emesso.

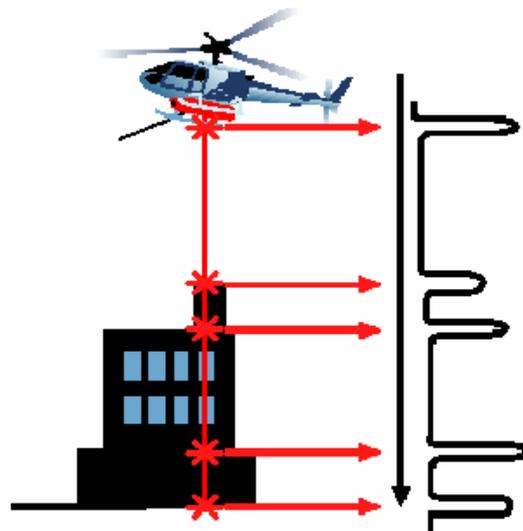


Figura 7.3. Esempio di registrazione di echi multipli.

Le esperienze riportate in letteratura confermano che l'errore che si commette nella stima della quota di un punto è inferiore a 30 cm mentre, l'errore che si commette nella stima della posizione planimetrica è inferiore al metro.

Il laser scanner non può, tuttavia, essere usato in presenza di nubi perché la riflessione completa del raggio impedisce di penetrare gli specchi d'acqua. Esistono tuttavia sul mercato dei sistemi il cui raggio laser ha una lunghezza d'onda variabile dal rosso al blu in grado di passare attraverso l'acqua e stimare la posizione dei punti del fondale.

Una volta scelti gli strumenti presenti sul mercato l'unica variabile delle riprese aeree è la quota di volo. Condizione necessaria affinché non si abbiano ambiguità nell'interpretazione di dati rilevati è che il raggio *i+1-esimo* sia emesso quando gli echi del raggio *i-esimo* sono rientrati al sensore (Casella, 1998).

Se si considera che:

$$t = \frac{2h}{c} < \frac{1}{f} = T \quad (7.2)$$

allora risulta che

$$h < \frac{c}{2f} \quad (7.3)$$

Il periodo T , dipende dallo strumento utilizzato e pertanto la quota di volo raggiungibile è funzione di tale strumento. Dal momento che il valore massimo di frequenza raggiunto con i sistemi attualmente presenti sul mercato è di 80 KHz (*TopoSys*), si può concludere che la quota di volo massima che l'aeromobile può raggiungere è 1873 m.

Generalmente per la copertura di qualsiasi zona occorrono più strisciate ma, a causa di errori indotti dai vari sensori, potrebbe verificarsi la non corretta sovrapposizione delle strisciate adiacenti. Per tale motivo, prima di ogni rilievo, si esegue la calibrazione del sistema *Laser*.

Il primo prodotto della scansione è il DSM (*Digital Surface Model*) e cioè una nuvola di punti della zona sorvolata la cui densità varia da qualche unità per metro quadrato ad alcune decine di metri quadrati. Tali punti possono essere utilizzati direttamente o elaborati attraverso tecniche di interpolazione e filtraggio. Con i software grafici *Micro Station* e *Terra Scan* (Figura 7.4) è possibile classificare e filtrare i punti rilevati durante il volo e costruire superfici del terreno aderenti alla realtà rilevata: infatti, dalla prima acquisizione è necessario non solo eliminare tutti

i punti rilevati ma estranei all'ambiente da studiare (per esempio quelli che identificano la posizione di volatili), ma anche sostituire la nuvola di punti iniziale e di difficile interpretazione con delle classi di punti (vegetazione, terreno, edifici,...).

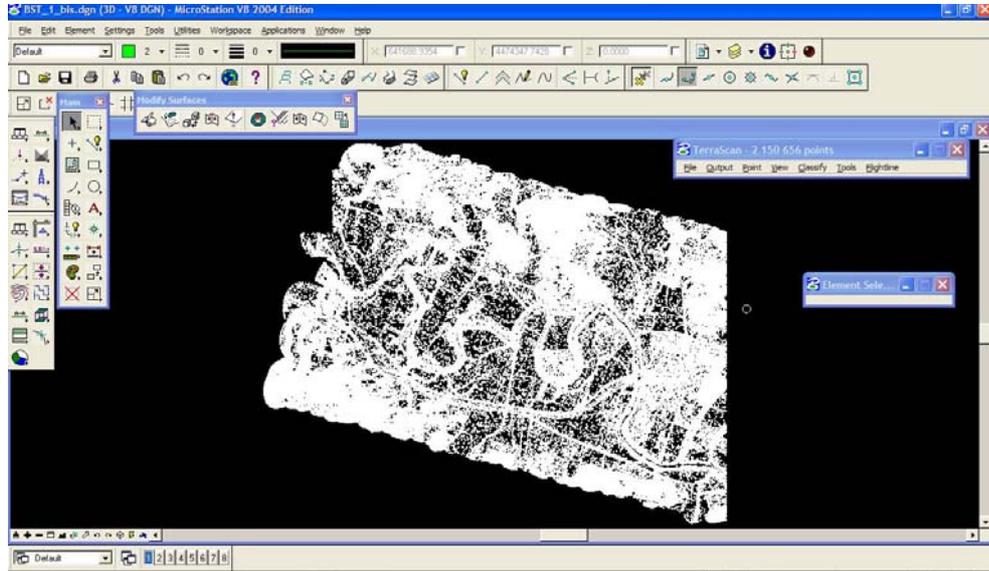


Figura 7.4. Nuvola di punti relativi al solo terreno nel tratto vallivo del Fiume Basento visualizzati con il software TerraScan.

8. TECNOLOGIA LASER-SCAN E AEROFOTOGRAMMETRIA LUNGO LA COSTA JONICA LUCANA

Su incarico dell'Autorità di Bacino Interregionale di Basilicata, la GEOCART s.r.l. ha eseguito nel 2006 i rilievi necessari alla produzione di un modello digitale del terreno di precisione e di ortofoto lungo la fascia jonica lucana e parte dei corsi d'acqua principali, proprio allo scopo della individuazione delle aree a rischio di inondazione. A tale scopo sono state utilizzate tecnologie di laser-scanning e di aerofotogrammetria digitale.

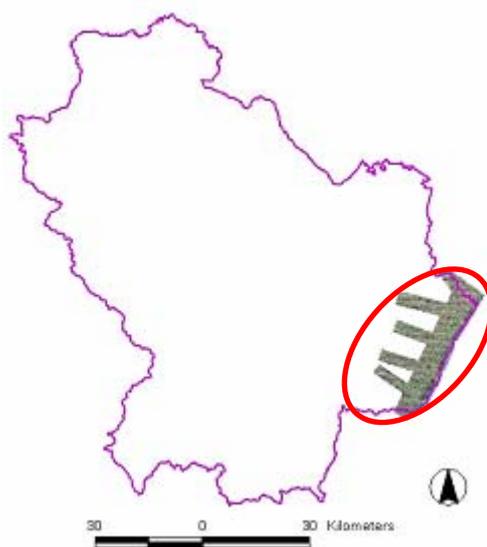


Figura 8.1. Individuazione della fascia jonica lucana interessata dal rilievo laser-scan nel 2006.

8.1. LA COSTRUZIONE DEL DTM LASER

Uno dei sistemi di rilievo più diffusi è il “*TopEye*” costituito da un insieme di sensori installati su un elicottero che permettono di generare un DTM con errori paragonabili a quelli propri di una cartografia a media-grande scala.

L'accuratezza finale è influenzata da diversi fattori derivanti dalle caratteristiche tecnologiche dei sensori a bordo, dalla quota di volo, dalla morfologia del terreno e dall'effetto della rifrazione atmosferica. L'accuratezza delle coordinate finali assolute dei *raw data* risulta essere, nei migliori dei casi, contenuta entro i 20÷40 cm. Anche la densità di campionamento condiziona l'accuratezza finale dei dati:

essa dipende dalla dimensione del set di dati, dalla velocità di esecuzione del volo, dal dettaglio che si vuole ottenere dalle caratteristiche morfologiche della zona da rilevare. Per una superficie estesa e regolare può bastare rilevare un punto ogni 10 metri quadrati mentre, per rilievi di maggior dettaglio in zone morfologicamente complesse, sono necessari dai 3 ai 5 punti per metro quadrato.

L'acquisizione dei dati lungo la costa jonica è avvenuta mediante l'impiego di un sistema "Topeye" integrato denominato "Topeye MKII" montato su elicottero e costituito da un laser scanner, da un sistema di posizionamento GPS (*Global Positioning System*) e da un sistema di orientamento inerziale INS (*Inertial Navigation System*).

Il sistema Laser-Scan utilizzato acquisisce in modalità *Full waveform* per migliorare l'analisi delle discontinuità della superficie e caratterizzare la vegetazione. Rispetto ai normali telemetri in commercio, il "Topeye MKII" è in grado di registrare, oltre al *First Pulse* e *Last Pulse*, l'intera forma dell'onda di risposta e quindi di raccogliere un numero indefinito di echi intermedi.

Descrizione	Precisione/prestazione
Densità di punti minima per ogni quadrato sia per i dati <i>first pulse</i> che <i>last pulse</i>	circa 4 punto per metro quadrato
Precisione in quota in aree aperte	+/- 0.15 m
Precisione in quota in aree con densa vegetazione (copertura arborea > 70%)	+/- 0.40 m
Precisione planimetrica	+/- 0.30 m
DTM a maglia quadrata	5x5 e MKP
Echi per impulso laser	Full Waveform

Tabella 8.1. Precisioni/prestazioni fornite dal rilievo eseguito dalla GEOCART s.r.l. per conto dell'AdB di Basilicata nel 2006.

Dalle informazioni raccolte durante il rilievo è stato generato il DSM (*Digital Surface Model*) della fascia jonica. Alla costruzione del DTM (*Digital Terrain Model*) si è pervenuti, in collaborazione con la GEOCART, classificando preliminarmente i punti del DSM in:

- default;

- ground, punti rappresentativi del solo terreno;
- low vegetation, punti caratteristici della vegetazione bassa;
- medium vegetation, punti caratteristici della vegetazione di media altezza;
- high vegetation, punti caratteristici degli arbusti;
- buildings, punti rappresentativi delle costruzioni;
- low points, punti non appartenenti a nessuna delle classi considerate. Si tratta di punti isolati posizionati ad altezze non congrue come sotto il terreno o solitari nello spazio determinati da errori strumentali, da falsi riflessi o da oggetti realmente presenti durante il rilievo (per esempio, buche, volatili,..);
- MKP (*Model Key Points*), si tratta dei cosiddetti “*punti chiave*” posizionati in corrispondenza di cambi di pendenza significativi e indispensabili alla creazione del DTM utilizzato per le elaborazioni idrauliche descritte ai capitoli seguenti.

A partire dai soli punti classificati come *Ground* è stato estratto il *Model Key Points*. Il MKP consente la creazione di un DTM leggero e gestibile anche con hardware poco potenti perché, diradando la nuvola di punti sulle zone omogenee e conservando un opportuno infittimento in corrispondenza delle discontinuità del terreno, permette una facile visualizzazione della morfologia del territorio.

Dal MKP, attraverso un algoritmo di interpolazione che ad ogni cella assegna una quota calcolata sulla media di tutti i punti ricadenti al suo interno, è stato generato un DTM a maglia quadra con passo 5 m.

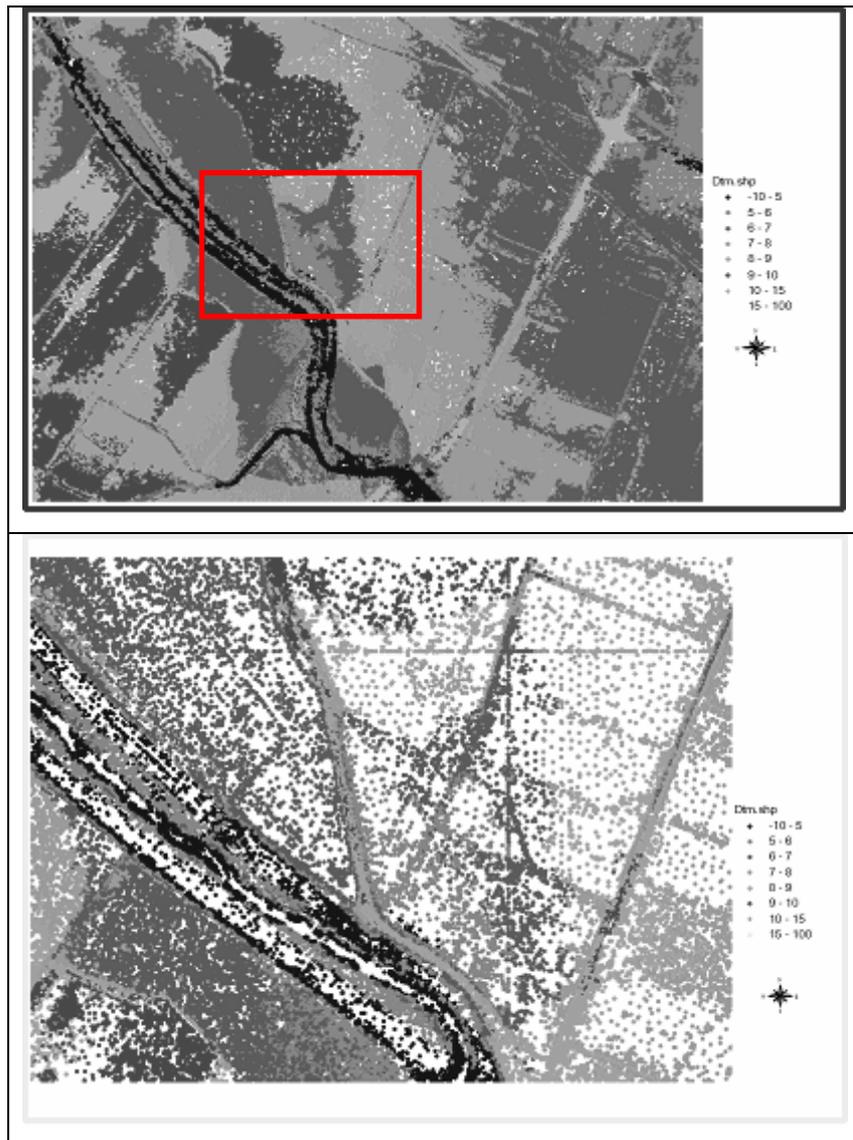


Figura 8.2. MKP (*Model Key Point*) del tratto vallivo del Fiume Basento. La figura in basso rappresenta un ingrandimento dell'area delimitata dal rettangolo rosso della figura in alto. Si noti, nella figura in basso, come i punti del MKP sono più diradati nelle aree pianeggianti.

8.2. LA REALIZZAZIONE DELLE ORTOFOTO

Le riprese aerofotogrammetriche e le successive operazioni di realizzazione delle ortoimmagini sono state effettuate nel 2006 utilizzando una camera fotogrammetrica 23 cm x 23 cm installata su un aeromobile.

Le curve di livello sono state restituite considerando un'equidistanza di 5m con curve ausiliare di 1 m, mentre i punti quotati riportati in numero di 25 per ogni dm² di carta stampata. La Figura 8.3 contiene una sintesi delle caratteristiche principali delle riprese aerofotogrammetriche realizzate.

Descrizione	Precisione/prestazione
Ortofoto digitali con dettaglio cartografico e tolleranze proprie della scala	1:2000
Errore massimo planimetrico	+/- 0.75 m
Errore massimo altimetrico	+/- 0.40 m
Equidistanza dalle curve di livello	5 m con ausiliarie di 1 m
Punti quota per ogni dm ² di carta stampata	25

Figura 8.3. Precisioni/prestazioni fornite dalle riprese aerofotogrammetriche eseguite dalla GEOCART s.r.l. per conto dell'AdB di Basilicata nel 2006.

8.3. VERIFICA DELLE INFORMAZIONI ESTRATTE DAL MKP (*MODEL KEY POINT*)

Lo studio della morfologia della costa jonica è stato effettuato facendo riferimento ad un'area ubicata in corrispondenza delle foci del Basento e del Bradano di circa 80 km² e prendendo a riferimento il MKP (*Model Key Points*) generato a partire dai soli punti classificati come *Ground*.

È parso dunque necessario avviare un preliminare confronto tra le informazioni estratte dal MKP e quelle derivanti dal rilievo topografico eseguito lungo le aste principali dei fiumi lucani. Questo allo scopo di verificare la possibilità di implementare i modelli numerici mono e bidimensionali descritti più avanti utilizzando le informazioni sul canale principale e sul flooplain estrapolate dal *Model Key Points*.

Il confronto ha interessato le sezioni trasversali rilevate in situ nel 2004 lungo il tratto vallivo del solo fiume Basento che si estende per circa 10 km a monte della foce e le sezioni estrapolate (nello stesso tratto e nella identica posizione) dal MKP (*Model Key Points*).

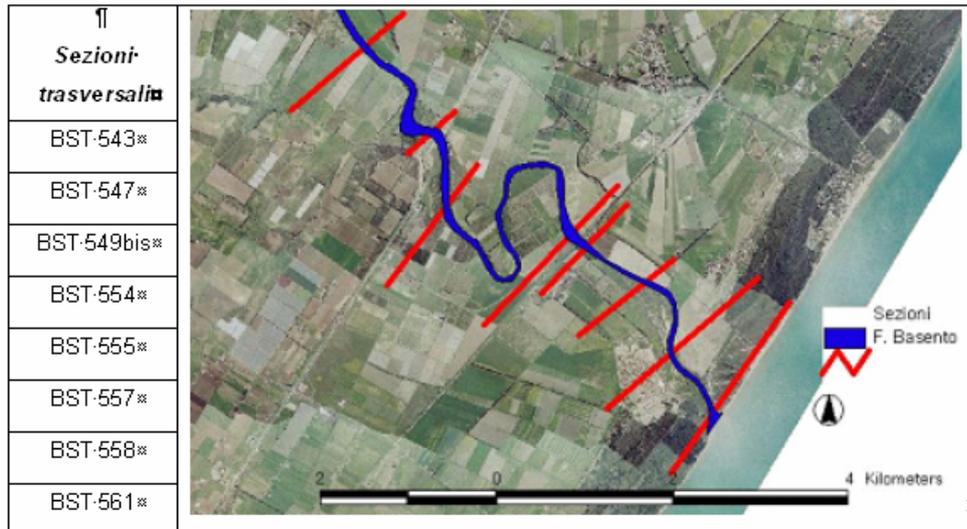


Figura 8.4. Sezioni trasversali considerate per il confronto elencate da monte verso valle (a sinistra) e loro ubicazione su ortofoto (a destra).

A partire dal TIN generato dal MKP e, lavorando in ambiente GIS, sono state estratte otto sezioni trasversali aventi la stessa posizione ed estensione di quelle rilevate in situ (BST543, BST547, BST549bis, BST554, BST555, BST557, BST558 e BST561).

Dai risultati sintetizzati nel grafico seguente si evince che generalmente il canale principale estratto dal MKP fornisce una quota di fondo significativamente più alta di quella rilevata in situ. Questo a causa della riflessione competitiva che subisce il raggio elettromagnetico nell'infrarosso utilizzato dal laser scanner quando investe gli specchi d'acqua.

Le differenze riscontrate sono sempre superiori a 0.5 m e, tralasciando la prima sezione di monte per la quale si nota una differenza anomala di oltre 3.5 m, si può addivenire ad una differenza media di 1.17 m.

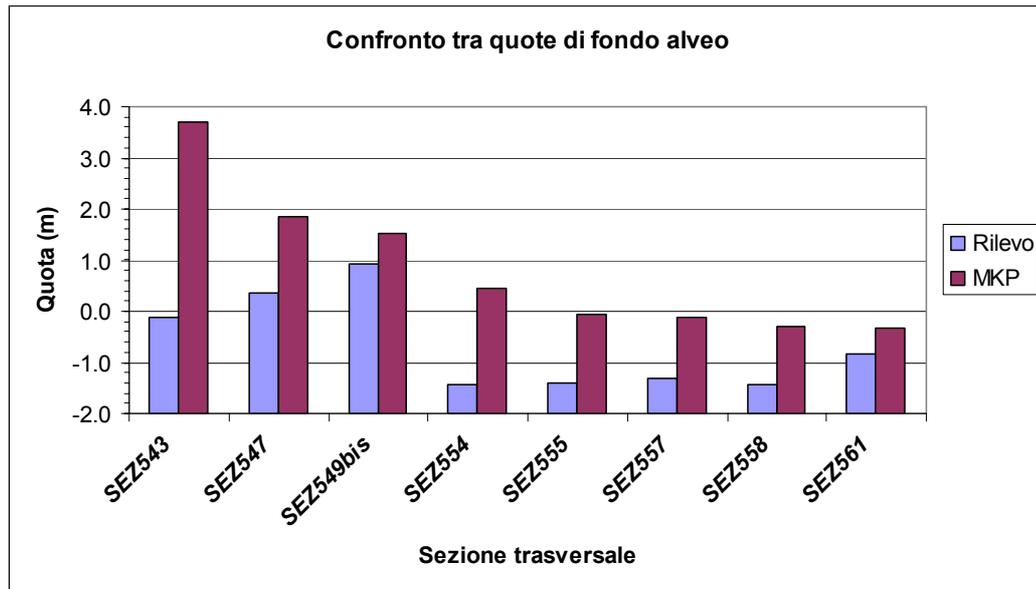


Figura 8.5. Confronto tra le quote di fondo alveo delle sezioni rilevate ed estrapolate dal MKP.

Per quel che concerne il *floodplain* e gli elementi naturali e non su di esso presenti, il MKP fornisce, senza ombra di dubbio un dettaglio maggiore, come può essere constatato dal confronto tra sezione rilevata ed estrapolata mostrata nella Figura 8.6.

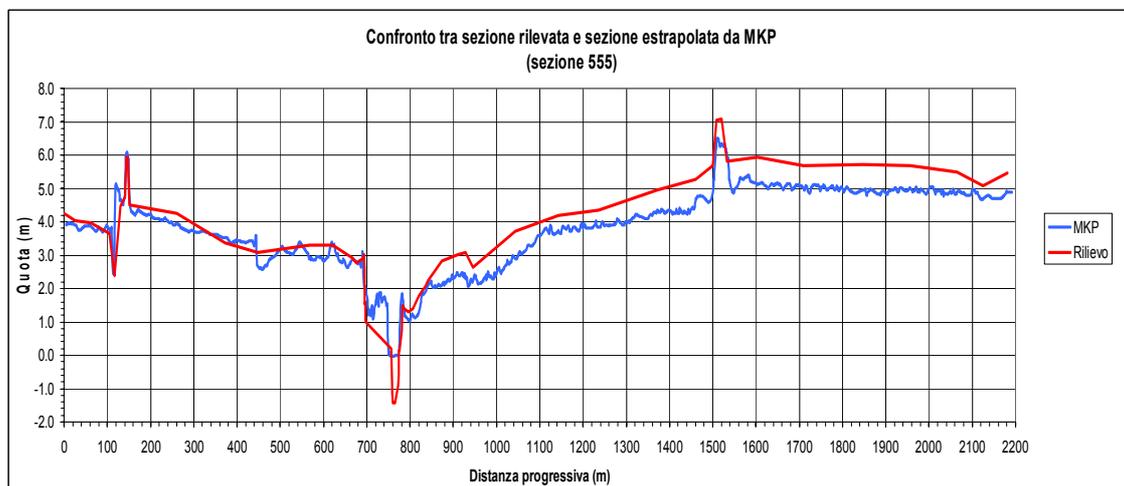


Figura 8.6. Confronto tra la sezione BST555 rilevata (in rosso) ed quella estrapolata nella stessa posizione dal MKP (in blu).

Alla luce dei risultati appena ottenuti la caratterizzazione morfologica necessaria per le valutazioni sulla propagazione dell'onda di piena presentate di seguito si farà riferimento:

- ai rilievi in situ del 2004 per l' acquisizione delle informazioni sul canale principale (sia del Basento che del Bradano) ritenendo non accettabile un errore di oltre 1 m per sezioni trasversali caratterizzate da una *depth* di 4-5 m;
- al modello digitale del terreno a disposizione per ricavare tutte le informazioni relative al floodplain e agli elementi su di esso presenti (rilevati stradali, argini,..) in termini di posizione, di estensione, continuità e di quota.

9. L'ANALISI IDROLOGICA

L'analisi idrologica del Fiume Basento e del Fiume Bradano è stata realizzata calcolando gli idrogrammi sintetici aventi come portate di picco quelle con tempo di ritorno di 30 e 200 anni valutate con la metodologia VAPI nella sezione in cui i due fiumi sono intercettati dalla S.S: 106 jonica.

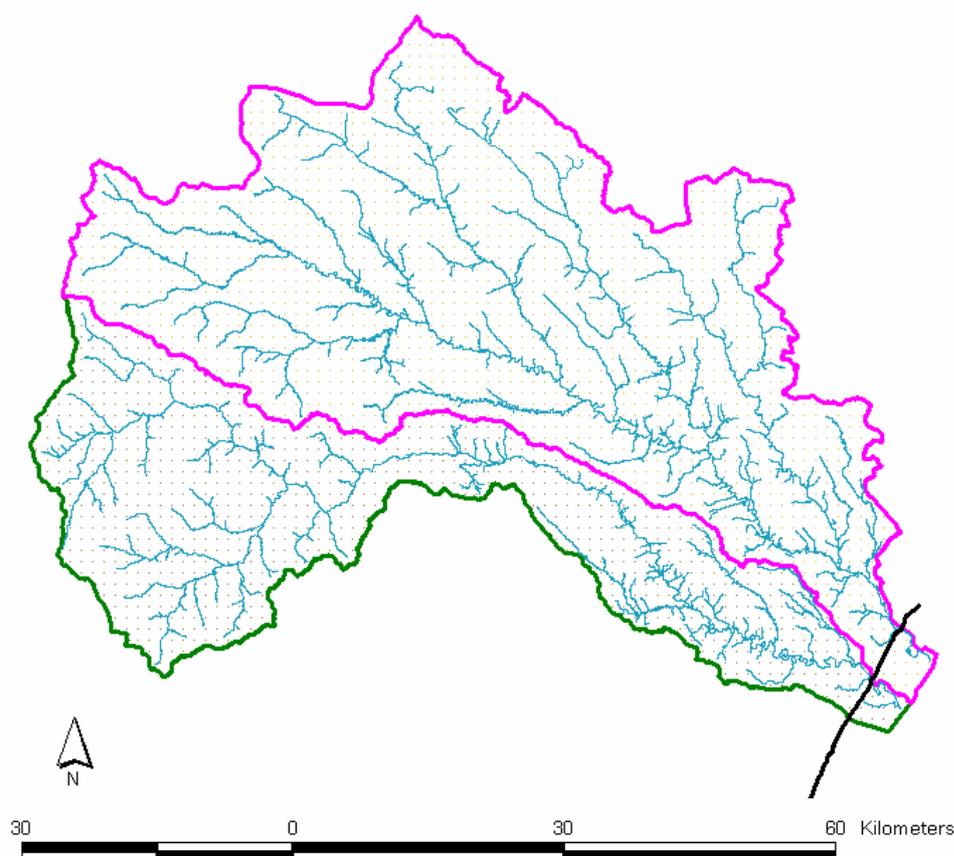


Figura 9.1. Bacini idrografici del F. Bradano (in rosa) e del F. Basento (in verde) con localizzazione della S.S. 106 jonica (linea nera) in corrispondenza della quale sono state calcolate le portate di piena con la metodologia VAPI Basilicata.

Il riferimento alle portate VAPI Q_{30} e Q_{200} deriva dalla scelta di garantire una continuità e, quindi, una connessione tra le aree inondabili dei fiume Basento e Bradano monte della S.S. 106 jonica (già delimitate dall'AdB di Basilicata ricorrendo ad una simulazione monodimensionale in moto permanente) e quelle relative al tratto fluviale che si estende a valle della S.S. 106 jonica fino al mare.

L'idrogramma sintetico viene in generale dedotto dalle curve di riduzione dei colmi di piena. Per tali curve, il NERC (1975), sulla base di un'analisi dettagliata sui fiumi della Gran Bretagna, suggerisce la seguente relazione:

$$\varepsilon_{D,T} = \frac{Q_{D,T}}{Q_T} = \left(1 + \frac{D}{t^*}\right)^{b-1} \quad (9.1)$$

in cui Q_T è la portata al colmo di piena relativa al periodo ritorno T , $Q_{D,T}$ è il valore medio della portata di piena defluente, con periodo di ritorno T , nella prefissata durata D , t^* è un tempo caratteristico strettamente legato al tempo di risposta del bacino idrografico e b un parametro poco correlato alla scala ed alle caratteristiche geomorfologiche del bacino stesso.

La (9.1) è indipendente dal periodo di ritorno. Inoltre, Silvagni (1984) ha mostrato come nel caso di alcuni bacini idrografici campani il parametro di forma b possa essere assunto pari all'esponente n della curva di possibilità pluviometrica mentre il fattore di scala temporale t^* sia strettamente correlato al tempo di ritardo t_r del bacino idrografico secondo la relazione $t^* = 2.1t_r$.

Estendendo quanto sopra detto anche ai bacini lucani, può dunque ipotizzarsi che nel caso in esame valga la relazione:

$$\varepsilon_{D,T} = \left(1 + \frac{D}{2t_r}\right)^{n-1} \quad (9.2)$$

Principalmente sulla base dell'equazione (8.2), Fiorentino e Margiotta (1998) hanno ottenuto la seguente espressione dell'idrogramma sintetico

$$Q(t) = Q_T e^{-2|t|/k_V} \quad (9.3)$$

dove k_V è un parametro legato all'esponente n della curve di possibilità pluviometrica ed al tempo di ritardo t_r tramite l'espressione

$$k = 1.027 \cdot t_r \cdot e^{2.277 \cdot n} \quad (9.4)$$

Quindi, l'idrogramma sintetico di equazione (9.3) associa ad ogni finestra temporale di ampiezza D (rispetto all'asse verticale di simmetria) la portata $Q_{D,T}$.

In definitiva, stimando t_r attraverso la relazione (9.4) suggerita da Rossi (1974), si sono ottenuti gli idrogrammi di piena sintetici (per $T_R = 30$ e 200 anni) riportati nelle Figure 9.2 e 9.3. Nel caso di bacini lucani, infatti, Rossi lega il tempo di ritardo t_r alle caratteristiche dell'asta principale secondo la formula:

$$t_r = 0.77 \left(\frac{L}{\sqrt{P}} \right)^{0.295} \quad (9.5)$$

in cui L è la lunghezza dell'asta principale in km, P la sua pendenza media (m/m) e il rapporto $\frac{L}{\sqrt{P}}$ va calcolato applicando la formula di *Taylor-Schwart*:

$$\frac{L}{\sqrt{P}} = \sum_{i=1}^{n_L} \frac{L_i}{\sqrt{P_i}} \quad (9.6)$$

basata sulla suddivisione dell'asta principale stessa in n_L tratti ciascuno dei quali avente lunghezza L_i e pendenza P_i .

Bacino	Basento alla S.S. 106 jonica
Area A (km ²)	1511
Tempo di ritardo t_r (ore)	8.3
Portata al colmo di piena per $T_R=30$ anni Q_{30} (m ³ /s)	1408
Portata al colmo di piena per $T_R=200$ anni Q_{200} (m ³ /s)	2270

Tabella 9.1. Caratteristiche principali del bacino idrografico analizzato e portate al colmo di piena valutate con la metodologia VAPI per tempi di ritorno T_R di 30 e 200 anni.

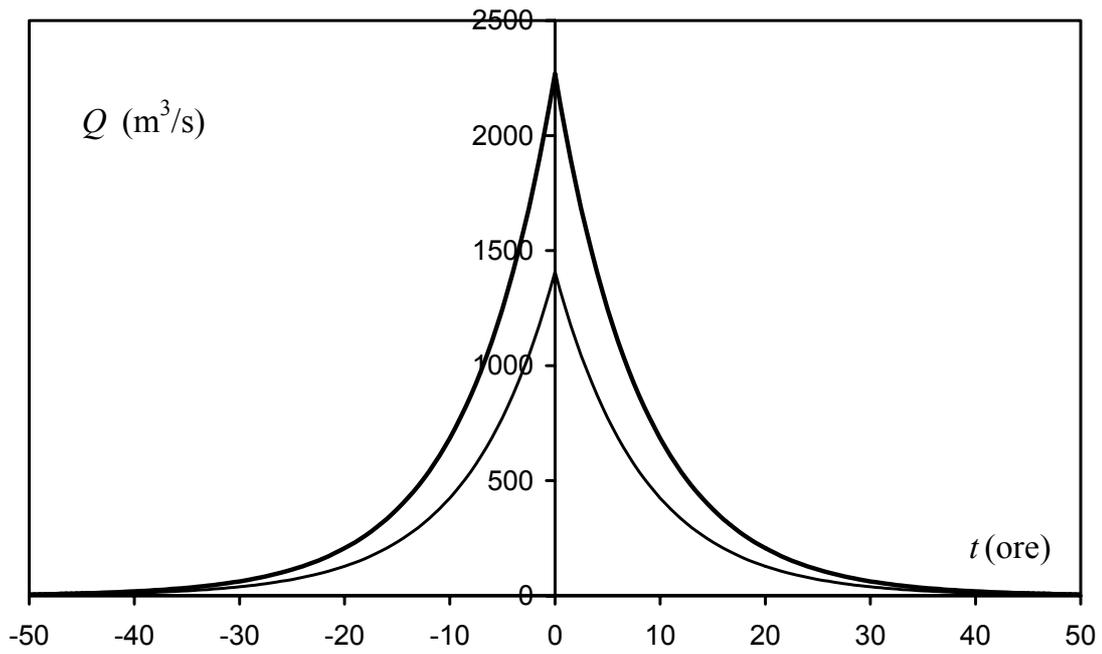


Figura 9.2. Idrogrammi sintetici di piena corrispondenti per i tempi di ritorno $T_R=30$ e 200 anni per il fiume Basento alla S.S. 106 jonica.

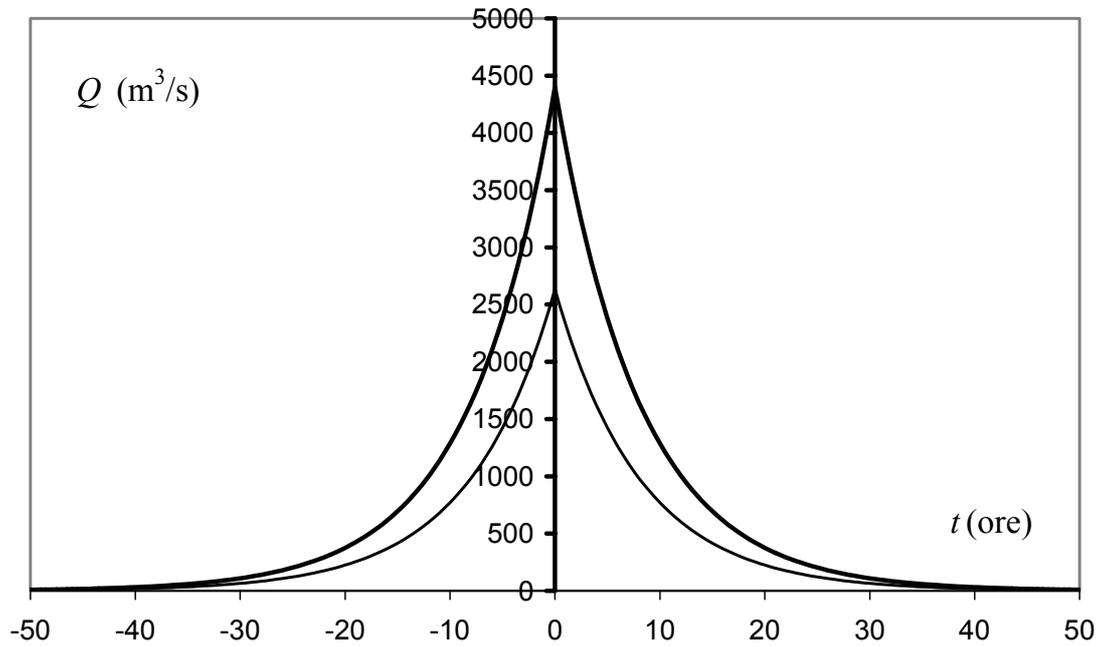


Figura 9.3. Idrogrammi sintetici di piena corrispondenti per i tempi di ritorno $T_R=30$ e 200 anni per il fiume Bradano alla S.S. 106 jonica.

10. LA TARATURA DEI MODELLI

L'applicazione di un qualsiasi modello può essere affetta da errori. Anche nel caso in cui si scelga il modello idrodinamico più affidabile e si rappresenti accuratamente l'area di interesse, si può incorrere in errori determinati da una inadeguata definizione numerica dei parametri idromeccanici (coefficienti di scabrezza e di viscosità dinamica, perdite di carico localizzate,..) contenuti nel modello di calcolo. La valutazione di tali coefficienti necessita quindi di una fase di taratura. Sebbene in assenza di misure si ricorra a valori dei coefficienti desunti dalla letteratura per situazioni simili, quando possibile la calibrazione del modello è fondamentale. Innanzitutto perché solitamente i valori tabellati sono stati misurati in condizioni di magra o di morbida e difficilmente si riferiscono a condizioni di piena. Inoltre i coefficienti di perdita di carico sono l'unico termine che può essere variato nelle equazioni alla base del modello, per cui su di essi ricadono tutte le imprecisioni del modello dovute al tipo di schematizzazione, alle ipotesi assunte ed, infine, alle condizioni al contorno.

Per il presente lavoro si è proceduto alla taratura del modello monodimensionale implementato dall'HEC RAS sul coefficiente di scabrezza *n di Manning* confrontando la grandezza idraulica *top width* (larghezza in superficie) ottenuta dalla simulazione idrodinamica in corrispondenza di alcune sezioni trasversali rilevate lungo il Fiume Basento con la larghezza dell'area allagata letta, in corrispondenza delle stesse sezioni, da immagini radar rilevate in occasione di eventi di piena.

I coefficienti di scabrezza del canale principale e del floodplain così determinati sono stati estesi anche alle simulazioni bidimensionali relative sia al Fiume Basento che al Fiume Bradano. Questo perché l'assenza di un DTM di dettaglio del tronco fluviale interessato dal confronto ha impedito l'implementazione anche dei modelli bidimensionali.

Tra gli eventi di piena considerati si è scelto quello registrato alla stazione di Campomaggiore il 10 gennaio 2003 mentre, il tratto fluviale analizzato è quello che si estende tra le sezioni trasversali BST323 e BST430 all'interno del macrotratto morfologico identificato come Medio Basento.

Le immagini radar ERS 2 utilizzate per la individuazione dell'ampiezza dell'area allagabile per l'evento di piena considerato hanno una risoluzione geometrica di 12.5 m e sono state gentilmente messe a disposizione dall'ESA. Nella tabella seguente si riporta il risultato della taratura effettuata: le *top width* (ampiezze in superficie) misurate sulle immagini radar e calcolate con il software HEC RAS sono ragionevolmente comparabili per valori del coefficiente di scabrezza n di Manning pari a $0.033 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ per il canale principale e $0.04 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ per il floodplain.

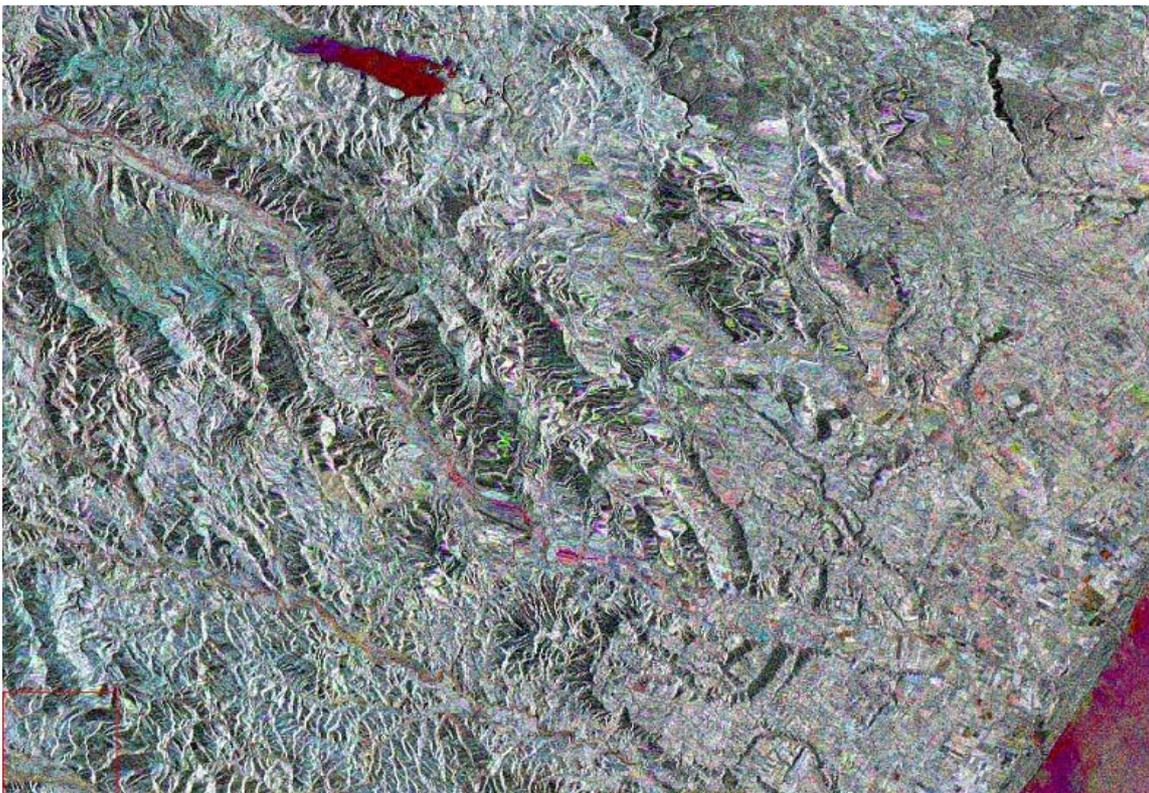


Figura 10.1. La fascia jonica lucana vista attraverso le immagini radar ERS 2 (© ESA).

Sezioni topografiche	Top width misurata (m)	Top width calcolata (m)
BST323	69	55
BST329	71	86
BST358	113	109
BST423	176	160
BST430	204	208

Tabella 10.1. Confronto tra l'ampiezza dell'area inondabile misurata su immagini radar ERS 2 e calcolata con il modello monodimensionale implementato da HEC RAS in corrispondenza di alcune sezioni trasversali del Fiume Basento. L'evento di piena considerato è quello del 10 gennaio 2003 e il coefficiente di scabrezza n di Manning è pari a $0.033 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ per il canale principale e $0.04 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ per il floodplain.

I valori rinvenuti sono altresì confermati dalla proposta contenuta in “*Open Channel Hydraulics*” (Chow, 1959): qui il coefficiente n di Manning assume un valore di $0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ per “*canali scavati in terra con presenza di pietrame grossolano*”, $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ per “*canali naturali con sponde e scarpata irregolare, fondo regolare e pulito con argilla e sabbia..*” e, infine, $0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ per “*trincea scavata in sabbia argillosa, fondo e pareti irregolari e vegetazione sulle sponde*”.

11. L'ANALISI IDRAULICA BIDIMENSIONALE

La necessità di definire una corretta estensione delle aree inondabili e calcolare corretti valori delle altezze idriche e delle velocità della corrente, per i diversi eventi simulati, in un'area estremamente pianeggiante come quella in esame ha suggerito il ricorso alla modellistica numerica bidimensionale.

Sinteticamente l'analisi idraulica bidimensionale, che interessa una superficie di circa 80 km² in corrispondenza delle foci del Basento e del Bradano, è stata effettuata allo scopo di:

- valutare la risoluzione ottimale della griglia di calcolo dei modelli bidimensionali utilizzati per definire le aree a rischio di inondazione dell'area in esame compatibilmente con i tempi di simulazione;
- confrontare le risposte dei codici di calcolo bidimensionali con quelle di modelli monodimensionali, in termini di massima estensione dell'area allagabile e di tirante raggiunto;
- definire la massima estensione delle aree inondabili dei due fiumi per i tempi di ritorno $T_R = 30$ e 200 anni a valle della S.S. 106 jonica;
- individuare eventuali interferenze tra i due corsi d'acqua esaminati.



Figura 11.1. Area di interesse in corrispondenza delle foci del Basento e del Bradano

Le valutazioni idrauliche bidimensionali sono state effettuate con l'ausilio dei due differenti software, FLO-2D ed MIKE 21 HD descritti paragrafo 3.3 a partire dalle informazioni estratte dal rilievo topografico per la caratterizzazione dell'alveo fluviale e dal MKP, invece, per la caratterizzazione del flooplain.

11.1. SULLA RISOLUZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO

Per entrambi i software utilizzati, basati sul metodo alle differenze finite, il dominio di calcolo è discretizzato mediante una griglia formata da linee rette a maglia costante. Le intersezioni della griglia, cioè i nodi, sono assunti come rappresentativi della porzione d'area che a loro compete ed in tali punti sono ricercate le soluzioni delle equazioni del moto. Conseguentemente il dominio continuo viene schematizzato attraverso un insieme di punti in corrispondenza dei quali la soluzione dell'equazione differenziale avviene per discretizzazione tra due nodi adiacenti:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = u_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x) - u(x)}{\Delta x} \quad (11.1)$$

dove δx è l'intervallo spaziale fra due nodi lungo un lato della griglia. La derivata rappresenta il limite del rapporto incrementale per δx che tende a zero; tuttavia nella (11.1) si può trascurare il passaggio al limite commettendo un errore tanto piccolo quanto δx è piccolo e cioè quanto le celle della griglia sono piccole.

In generale la possibilità di disporre di un DTM di estremo dettaglio, come quello in esame, porta a pensare che la schematizzazione dell'area di studio mediante una griglia avente celle di dimensioni ridotte sia la scelta più corretta per descrivere in maniera accurata la morfologia dell'area. In realtà, nella fase di implementazione del modello è necessario tenere in conto che, quale che sia il software utilizzato, i tempi di simulazione sono fortemente influenzati dalla risoluzione della griglia di calcolo. Pertanto, la scelta della dimensione della cella della griglia deriva, sostanzialmente, dall'individuazione di un giusto compromesso tra l'accuratezza della schematizzazione e il tempo necessario alla simulazione.

Nel presente lavoro la verifica sul legame tra tempo di simulazione e risoluzione della griglia di calcolo è stata effettuata facendo riferimento alla sola area di circa

40 km² in corrispondenza della foce del Basento e simulando la portata di piena secondo l'idrogramma sintetico descritto al capitolo 9 avente come picco la portata con tempo di ritorno T_R pari a 30 anni. Si è fatto riferimento ad entrambi i software descritti sopra, FLO-2D e MIKE 21 HD e per ognuno sono state considerate le seguenti dimensioni di cella:

- a) 100 m x 100 m;
- b) 80 m x 80 m;
- c) 60 m x 60 m;
- d) 40 m x 40 m.

Per ciascuno dei quattro scenari (a, b, c, d) è stata altresì confrontata l'estensione sia delle aree inondabili massime che quella con prefissato valore di altezza idrica. Questo allo scopo di definire la risoluzione della griglia di calcolo più adeguata a descrivere correttamente il fenomeno di propagazione dell'onda di piena nell'area considerata.

Il tempo di simulazione, ovviamente, aumenta al diminuire della dimensione della cella di calcolo per entrambi i software utilizzati. Nella Figura 11.2 si mostra l'andamento del tempo di simulazione adimensionalizzato rispetto al tempo di simulazione relativo alla risoluzione di 100 m al crescere della risoluzione della griglia: mentre per il FLO-2D tale relazione appare ben descritta da una funzione esponenziale, per il Mike 21 HD, esso cresce linearmente con il crescere della risoluzione della griglia.

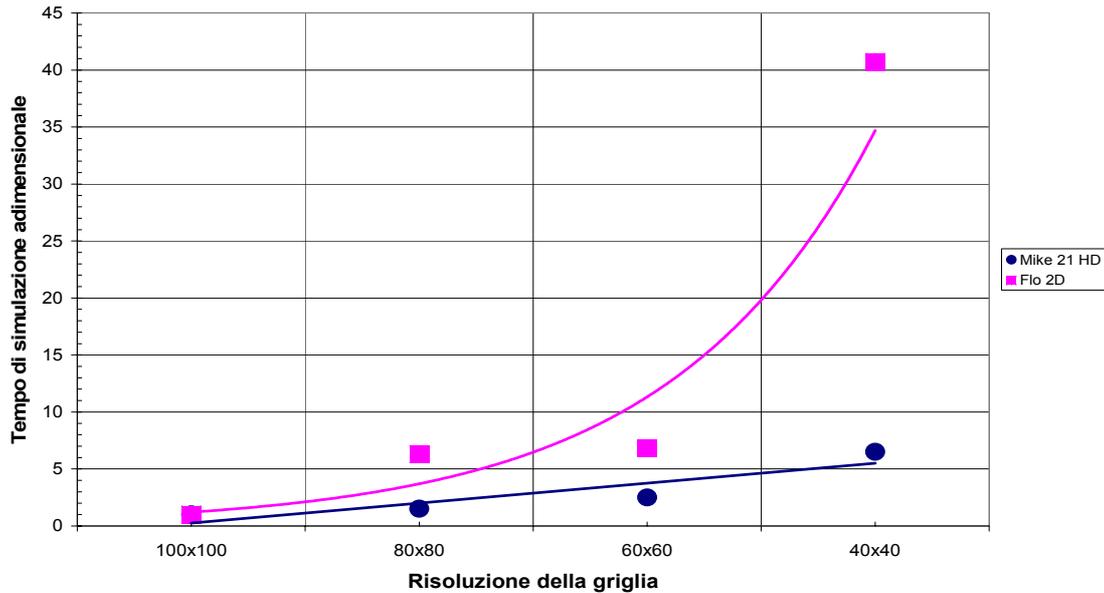


Figura 11.2. Tempo di simulazione adimensionalizzato in funzione della risoluzione della griglia di calcolo per i due software utilizzati: MIKE 21 HD (in blu) e FLO 2D (in magenta).

I risultati delle simulazioni numeriche bidimensionali, espressi in termini di area inondabile massima e area inondabile per fissato tirante, sono stati analizzati mediante un indice prestazionale (*Horritt & Bates, 2002*) frequentemente utilizzato nella calibrazione e verifica di modelli di allagamento:

$$P = \frac{A_{sim} \cap A_{oss}}{A_{sim} \cup A_{oss}} \quad (11.2)$$

dove A_{sim} e A_{oss} rappresentano rispettivamente i valori di area inondata risultante dalla simulazione attraverso il modello numerico e dell'area osservata. In realtà, mancando informazioni di eventi di piena realmente verificatisi e compatibili con l'evento simulato, per tutti i confronti effettuati si è considerata come A_{oss} quella di un maggiore dettaglio rappresentata dallo scenario d).

La Figura 11.3 mostrata di seguito evidenzia un'accettabile vicinanza del perimetro delle massime aree inondabili per risoluzioni di 100 m, 80 m e 60 m a quello relativo alla risoluzione 40 m visto che l'indice prestazionale P risulta sempre maggiore di 0.90 per le simulazioni effettuate con il FLO-2D e maggiore di 0.80 per quelle con il MIKE 21 HD.

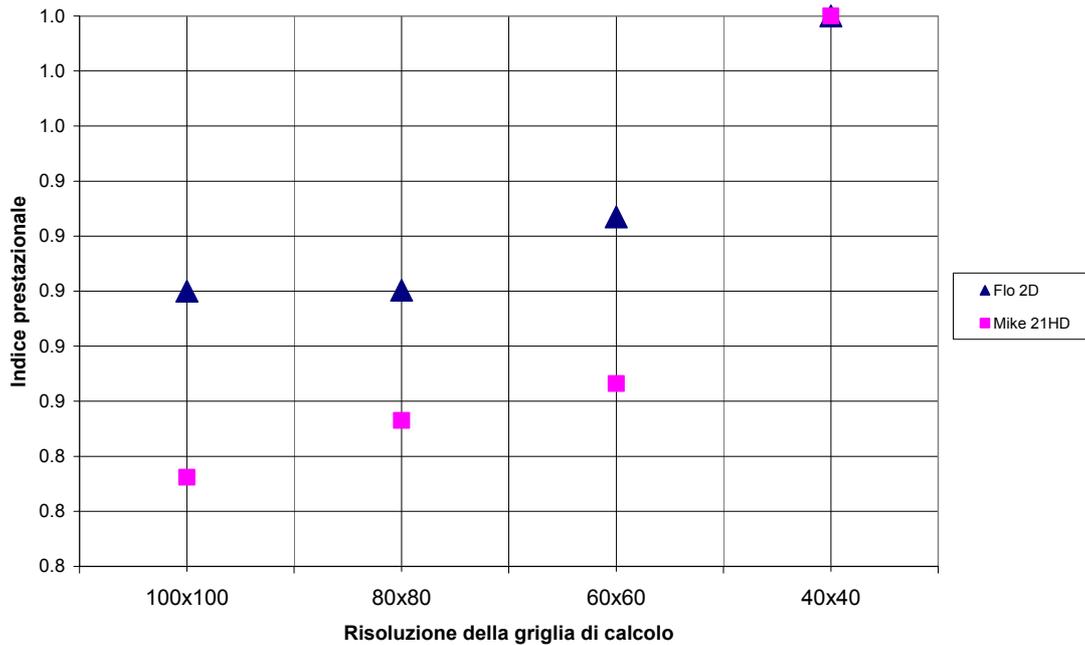


Figura 11.3. Andamento dell'indice prestazionale P in funzione della risoluzione della griglia di calcolo per i due software utilizzati: MIKE 21 HD (in blu) e FLO 2D (in magenta).

Per le valutazioni sulle aree inondabili con diverso tirante si è fatto riferimento ai soli risultati ottenuti con il FLO-2D considerando i quattro intervalli di altezza idrica di seguito indicati:

- $h \leq 0.30$ m;
- $0.30 \text{ m} \leq h \leq 0.60$ m;
- $0.60 \text{ m} \leq h \leq 0.90$ m;
- $0.90 \text{ m} \leq h \leq 1.20$ m.

La Figura 11.4, che contiene la sintesi delle valutazioni eseguite, mostra innanzitutto una marcata differenza tra i valori assunti dall'*indice prestazionale P* per l'intervallo $0.90 \text{ m} \leq h \leq 1.20$ m rispetto a quello degli altri tre intervalli. Questo a conferma del fatto che i tiranti maggiori si registrano, per qualsiasi dimensione di cella considerata, nella porzione di territorio confinata al solo intorno dell'alveo fluviale. Gli areali relativi agli altri tre intervalli di tirante, generalmente distribuiti sul *floodplain*, sono caratterizzati da un *indice prestazionale P* sempre minore di 0.6 e crescente col diminuire della dimensione della cella.

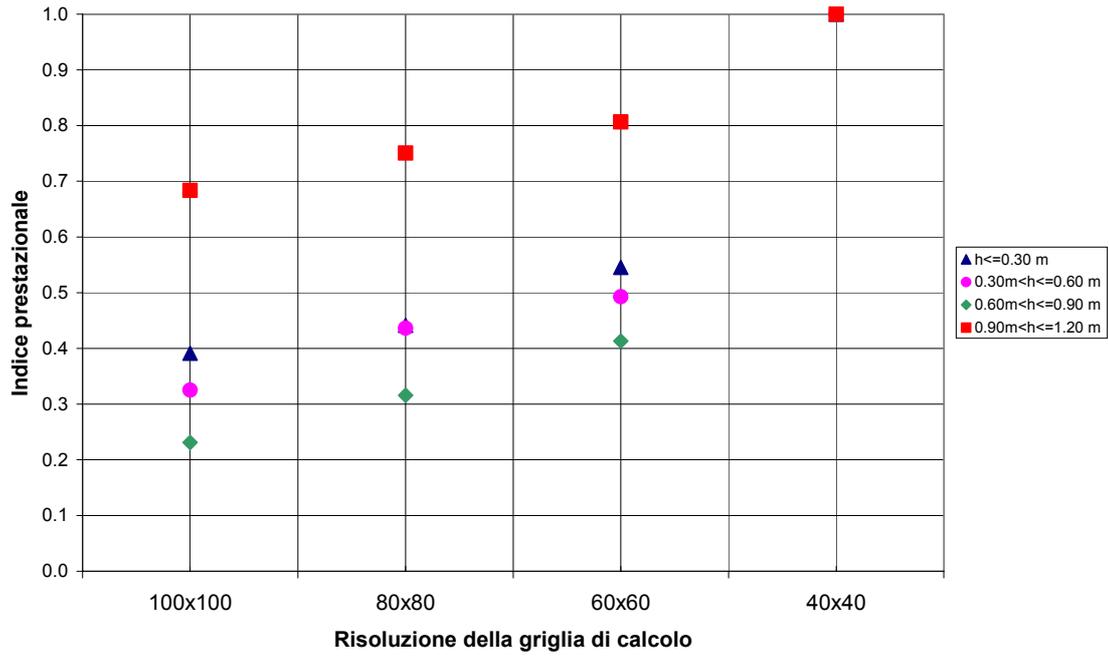


Figura 11.4. Andamento dell'indice prestazionale P delle aree inondabili a diverso tirante in funzione della risoluzione della griglia di calcolo. Software utilizzato: FLO 2D.

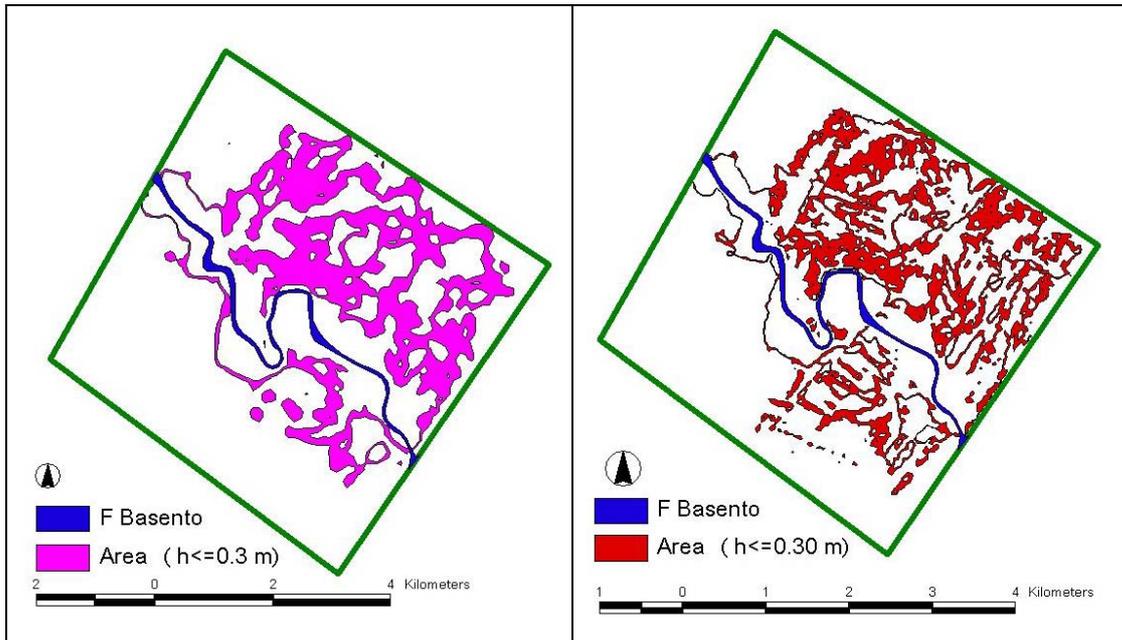


Figura 11.5. Confronto tra le aree inondabili con tirante $h \leq 0.30$ m ottenute dalla simulazione idraulica bidimensionale costruita su griglie a risoluzione 100x100 (sinistra) e 40x40 (destra)

12. CONFRONTO TRA MODELLI MONO E BIDIMENSIONALI

La crescente sensibilità nei confronti della prevenzione e della mitigazione degli eventi alluvionali e la contemporanea disponibilità di risorse di calcolo sempre più potenti ha sicuramente stimolato l'interesse della ricerca scientifica per la modellistica numerica bidimensionale. Tuttavia il ricorso a modelli idraulici monodimensionali è ad oggi molto frequente sia per la loro capacità di descrivere in maniera soddisfacente il comportamento dei corsi d'acqua sia per la loro maggiore semplicità di implementazione rispetto ai modelli bidimensionali. Tanto più che alcune indagini di letteratura (*Horritt et al., 2002*) hanno mostrato un'efficienza computazionale dei modelli monodimensionali superiore a quella offerta dai modelli bidimensionali.

In aggiunta, la disponibilità di moderne tecniche di rilievo capaci di fornire descrizioni numeriche della morfologia del corso d'acqua estremamente dettagliate e la crescente diffusione di strumenti di analisi GIS (*Geographic Information System*) per applicazioni idrologiche-idrauliche consentono di utilizzare i modelli monodimensionali anche per l'identificazione delle aree inondabili.

In questo contesto si è scelto di confrontare i risultati delle simulazioni idrauliche bidimensionali descritte precedentemente con quelli ottenuti dalla simulazione monodimensionale in moto vario ottenuta avvalendosi del sistema HEC-RAS sviluppato presso *l'Hydrologic Engineering Center, dall'United States Army Corps of Engineers*. Questo ulteriore confronto nasce dalla necessità di rispondere alle osservazioni avanzate dall'AdB di Basilicata, durante la redazione dello studio idraulico per la determinazione delle aree inondabili, circa l'inadeguatezza dei modelli matematici monodimensionali di descrivere il fenomeno di propagazione della piena alla foce dei fiumi lucani. HEC-RAS è un sistema diffusamente utilizzato per la riproduzione del comportamento idraulico monodimensionale e quasi bidimensionale di complessi sistemi di corsi d'acqua naturali e canali artificiali. Per quel che riguarda il presente lavoro si è utilizzato il modulo di calcolo di moto vario, UNET (Barkau, 1997) che risolve il sistema di equazioni di De Saint Venant scritte nella forma completa per correnti gradualmente variate, assumendo il moto monodimensionale.

L'area di studio è quella considerata per le simulazioni idrauliche bidimensionali di estensione pari a 40 km² in prossimità della foce del Basento.

La messa a punto di un modello monodimensionale richiede la descrizione della geometria del corso d'acqua per mezzo di apposite sezioni trasversali disposte ortogonalmente alla direzione di flusso della corrente. In accordo con quanto emerso dal confronto tra informazioni topografiche ottenute dal rilievo in campo e quelle estrapolate dal modello digitale del terreno, le sezioni utilizzate per implementare il modello sono state ottenute componendo il *canale principale* rilevato in situ e il *floodplain* estrapolato dal MKP (*Model Key Point*) e lavorando in ambiente GIS con l'ausilio dell'HEC GEO RAS. Nello specifico si è fatto riferimento alle 10 sezioni composte mostrate nella Figura 12.1.

L'infittimento delle sezioni è stato realizzato anche per ridurre le incertezze derivanti dall'interpolazione geometrica delle sezioni effettuata dal modello in modo automatico.

Per quanto concerne la resistenza la moto, sono stati utilizzati i valori del coefficiente di scabrezza n di Manning ricavati dalla taratura descritta al capitolo 10 e pari a $0.033 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ per il canale principale e $0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ per il floodplain.

La simulazione idraulica è stata effettuata in regime di moto vario considerando due differenti idrogrammi sintetici aventi come portata di picco rispettivamente la Q_{30} e la Q_{200} ottenute con la metodologia VAPI in corrispondenza della sezione Basento alla S.S: 106 jonica.

I risultati ottenuti, in termini di massima area inondabile e altezza idrica, sono stati confrontati con quelli della simulazione idraulica bidimensionale realizzata con l'ausilio del FLO-2D.

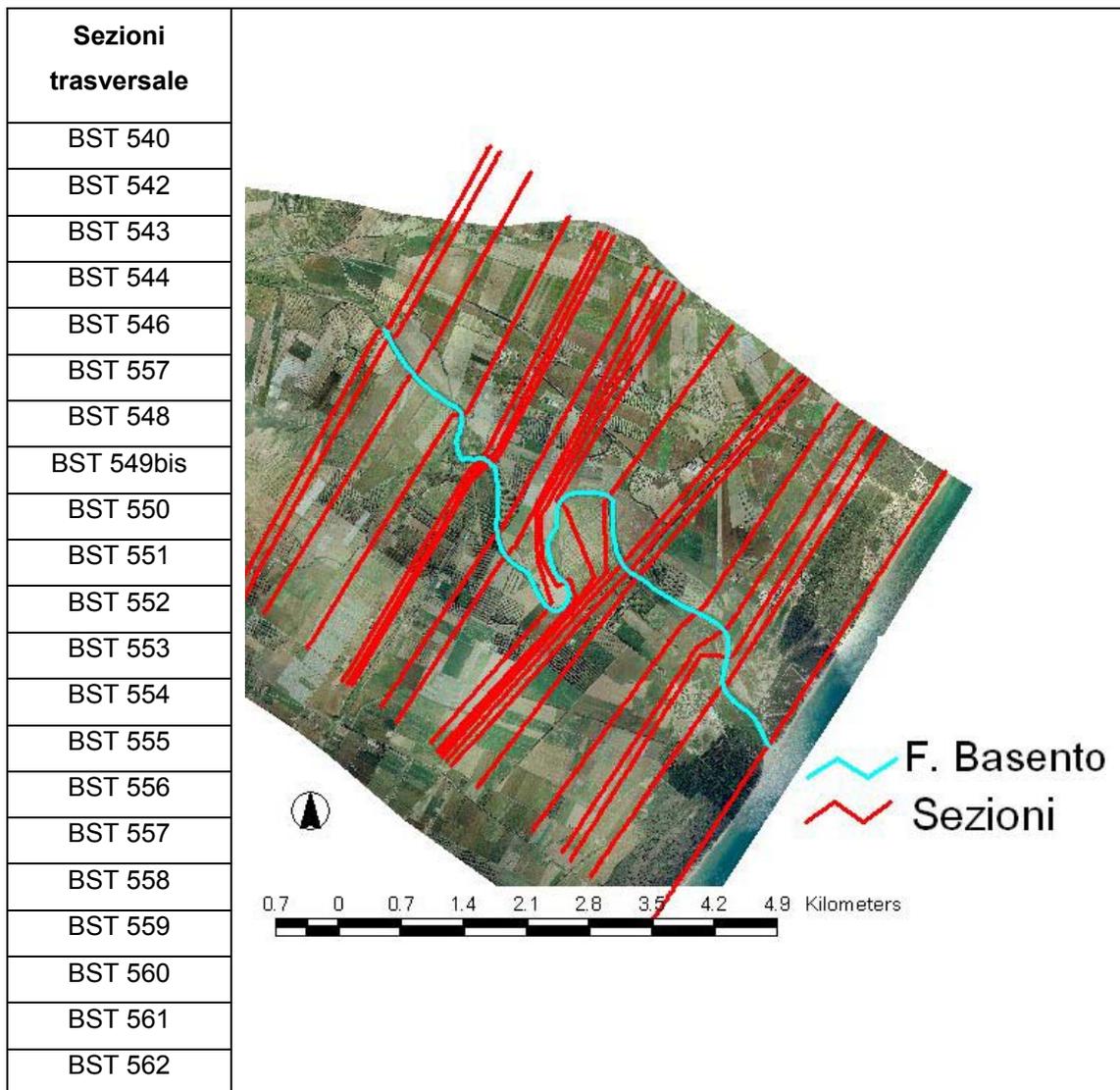


Figura 12.1: Sezioni trasversali del tratto vallivo del Basento (elencate da monte verso valle) (utilizzate per l'implementazione del modello monodimensionale attraverso il sistema HEC-RAS sviluppato presso l'Hydrologic Engineering Center, dall'United States Army Corps of Engineers).

Il confronto dei risultati mostra una netta differenza tra le simulazioni mono e bidimensionali sia per l'evento con tempo di ritorno $T_R = 30$ anni che per quello con $T_R = 200$ anni.

Relativamente all'evento con $T_R = 30$ anni, dalla simulazione 1D la Q_{30} risulta sempre contenuta in alveo o, al più, costretta tra gli argini e/o rilevati stradali che lambiscono il corso d'acqua sia in sinistra che in destra idrografica. Il perimetro dell'area inondabile in questo caso è, pertanto, prossimo a quello dello studio idraulico dell'AdB (relativo all'ultimo aggiornamento) ottenuto considerando le sole sezioni trasversali topografiche del 2004. Inoltre, sebbene la simulazione 1D sia stata costruita a partire dalle sezioni trasversali ricavate dal MKP (*Model Key Point*)

adeguatamente rappresentative della morfologia dell'area, la caratterizzazione del corso d'acqua e del floodplain rimane comunque discreta. Ciò impedisce, ovviamente, di evidenziare le insufficienze di rilevati arginali e/o stradali che invece, nella simulazione bidimensionale, determinano una maggiore estensione dell'area allagabile.

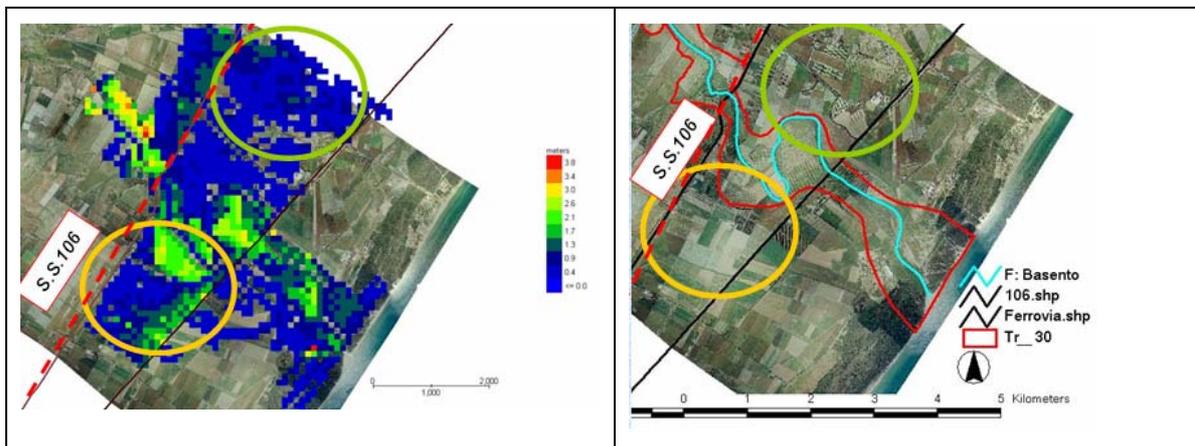


Figura 12.2. Aree inondabile per $T_R = 30$ anni alla foce del Basento. Risultati della simulazione bidimensionale con il FLO 2D e risoluzione di 100 m a sinistra e della simulazione monodimensionale con HEC RAS a destra.

Sempre in riferimento alla portata trentennale, i tiranti ottenuti con la simulazione 1D appaiono decisamente maggiori di quelli ricavati dalla simulazione 2D (Figura 12.3).

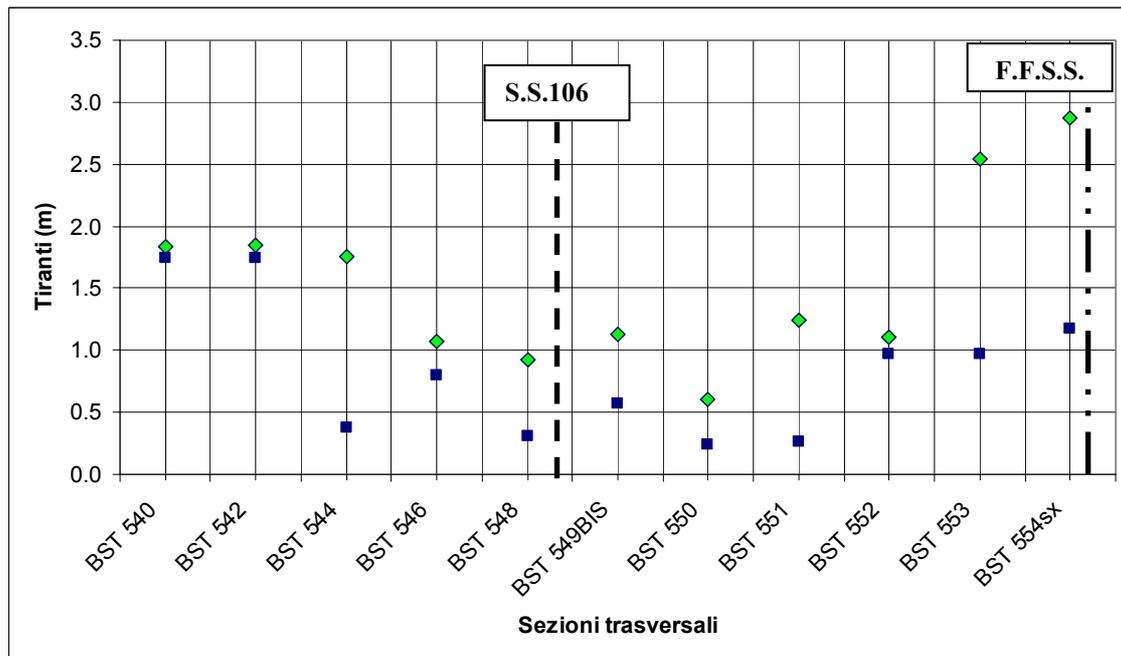


Figura 12.3. Confronto tra i tiranti ottenuti dalle simulazioni 1D (HEC RAS) e 2D (FLO-2D) per la portata Q_{30} in corrispondenza delle sezioni trasversali del tratto vallivo del Basento. I rombi verdi e i quadrati blu indicano rispettivamente i tiranti ottenuti dalla simulazione mono e bidimensionale.

Per la simulazione con T_R pari a 200 anni si nota una enfattizzazione delle differenze descritte precedentemente: la massima area inondabile ottenuta dal modello monodimensionale appare anche in questo caso minore di quella relativa alla simulazione 2D ed i tiranti 1D sono significativamente più alti di quelli 2D.

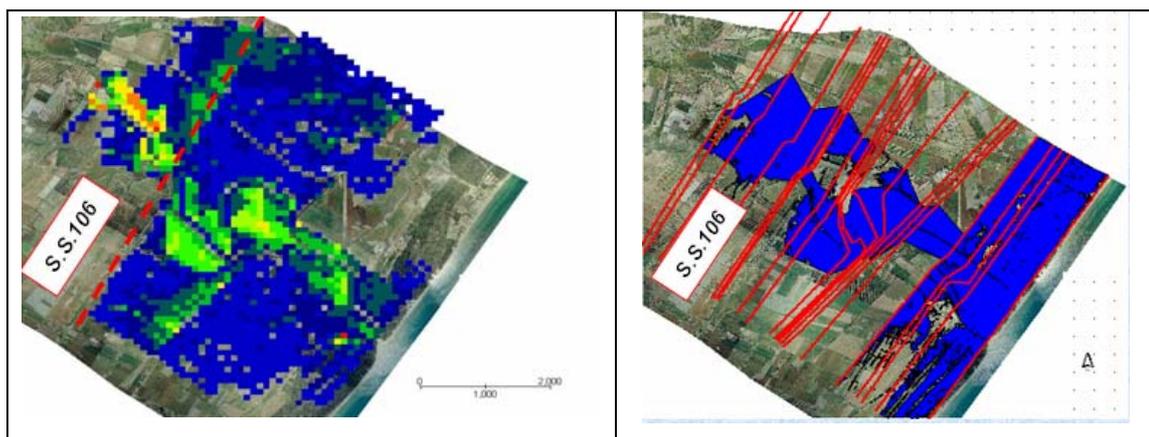


Figura 12.4. Aree inondabile per $T_R = 200$ anni alla foce del Basento. Risultati della simulazione bidimensionale con il FLO-2D e risoluzione di 100 m a sinistra e della simulazione monodimensionale con HEC RAS a destra.

Nella Figura 12.4 l'area inondabile bidimensionale è stata ricavata a partire da una griglia di calcolo con risoluzione geometrica pari a 100 m mentre, quella

monodimensionale è stata tracciata in ambiente GIS leggendo, attraverso l'HEC GEO RAS, i risultati ottenuti dall'HEC RAS.

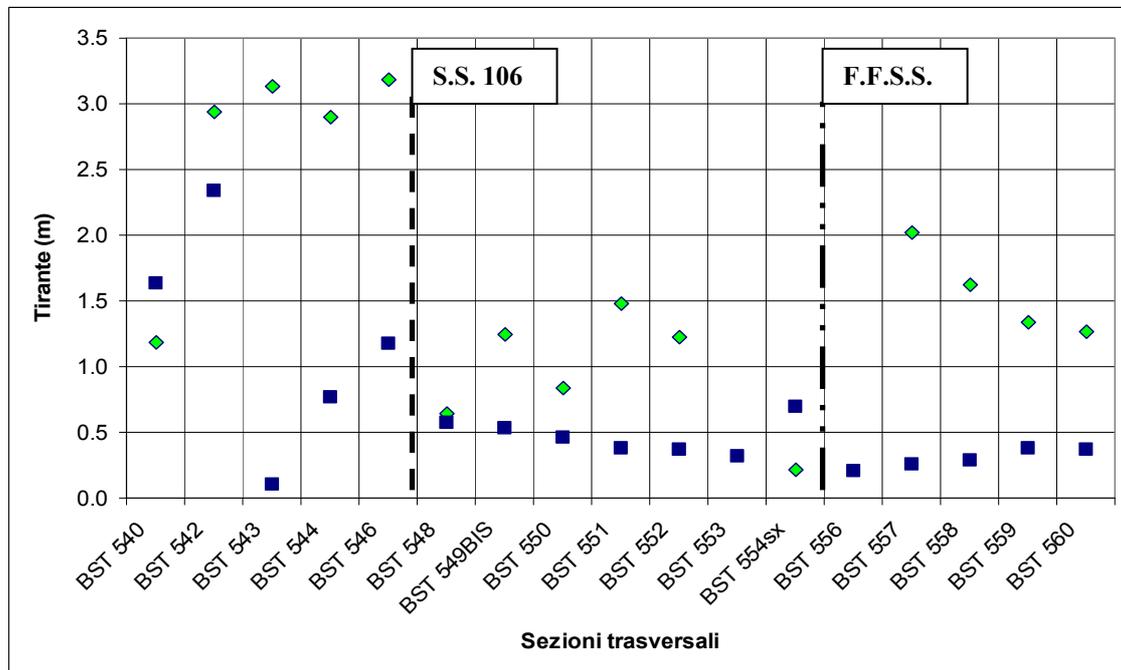


Figura 12.5. Confronto tra i tiranti ottenuti dalle simulazioni 1D (HEC RAS) e 2D (FLO-2D) per la portata Q_{200} in corrispondenza del floodplain di sinistra nel tratto vallivo del Basento. I rombi verdi e i quadrati blu indicano rispettivamente i tiranti ottenuti dalla simulazione mono e bidimensionale.

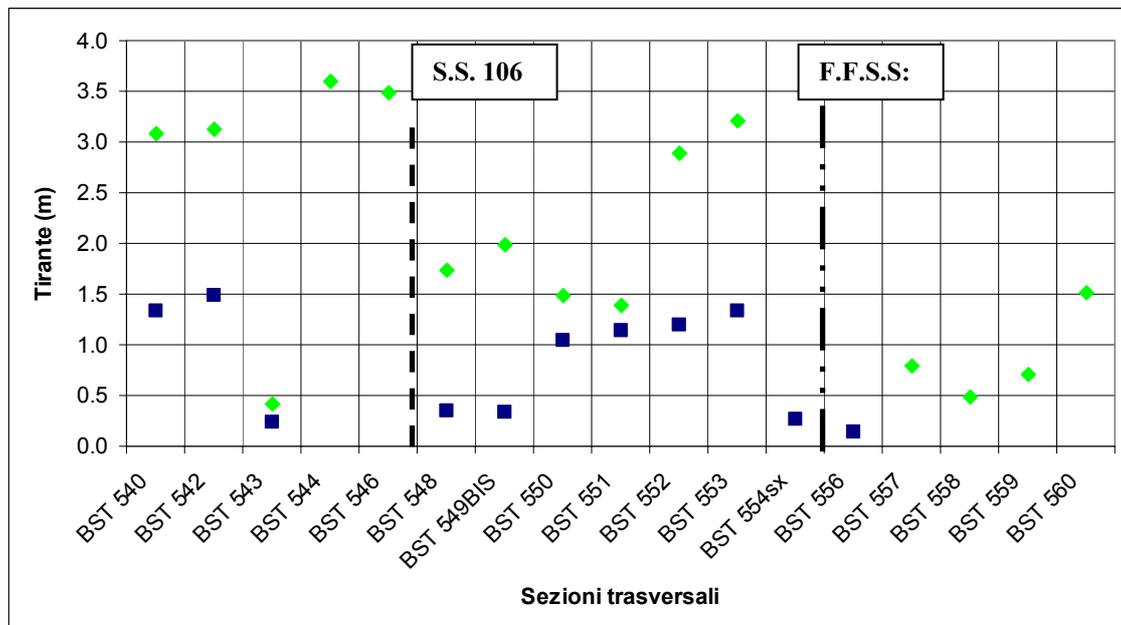


Figura 12.6. Confronto tra i tiranti ottenuti dalle simulazioni 1D (HEC RAS) e 2D (FLO-2D) per la portata Q_{200} in corrispondenza del floodplain di destra nel tratto vallivo del Basento. I rombi verdi e i quadrati blu indicano rispettivamente i tiranti ottenuti dalla simulazione mono e bidimensionale.

13. LA DELIMITAZIONE DELLE AREE ALLAGABILI A VALLE DELLA S.S. 106 JONICA E L'INTERAZIONE FRA BRADANO E BASENTO

Le valutazioni fin qui condotte mostrano che la delimitazione delle aree inondabili lungo i tratti fluviali che si estendono a valle della S.S. 106 jonica non può prescindere dal ricorso alla modellistica numerica bidimensionale. Infatti l'applicazione del modello monodimensionale sembra fornire aree allagabili sottostimate e tiranti irragionevolmente elevati.

La modellazione bidimensionale, inoltre, è stata realizzata adoperando due differenti software, il FLO-2D e il MIKE 21 HD, che hanno fornito risultati comparabili in termini di massima estensione dell'area allagabile sia per il periodo di ritorno T_R di 30 anni che per quello di 200 anni. Tuttavia i tempi di simulazione dei due software sono sensibilmente diversi e tale differenza si accentua all'aumentare della risoluzione geometrica della griglia di calcolo: a parità di condizioni e in riferimento alla griglia con risoluzione di 60 m, la simulazione realizzata con il MIKE 21 HD termina entro il minuto mentre quella con il FLO-2D necessita di 3 giorni.

Ne consegue che il FLO-2D, sebbene di più facile utilizzo, trova ragionevole applicazione solo quando la verifica che si vuole condurre non interessi aree estese schematizzate con griglie di calcolo ad elevata risoluzione.

Pertanto, per meglio descrivere la morfologia dell'area e per le valutazioni sulla eventuale interazione tra i fiumi limitrofi Basento e Bradano a valle della S.S. 106 jonica, si è adoperato il solo MIKE 21 HD: è stato così possibile considerare un dominio di calcolo di 80 km² e una risoluzione di 5 m.

L'individuazione del perimetro delle aree inondabili è stata realizzata facendo riferimento ad eventi di piena con tempo di ritorno T_R di 30 e 200 anni. In realtà il PAI Basilicata, all'art. 7 comma 1 individua tre differenti aree di pertinenza fluviale:

- a) le fasce di territorio ad alta frequenza di inondazione, corrispondente a piene con tempi di ritorno fino a 30 anni, sono le parti di territorio nelle quali esondano piene con tempi di ritorno T_R fino a 30, di pericolosità idraulica molto elevata;*
- b) le fasce di territorio a moderata frequenza di inondazione, corrispondente a piene con tempi di ritorno fino a 200 anni, sono le parti di territorio nelle quali*

esondano piene con tempi di ritorno T_R fino a 200, di pericolosità idraulica elevata;

- c) le fasce di territorio a bassa frequenza di inondazione, corrispondente a piene con tempi di ritorno fino a 500 anni, sono le parti di territorio nelle quali esondano piene con tempi di ritorno T_R fino a 500, di pericolosità idraulica moderata; e le aree destinate dal Piano ad interventi di sistemazione dei corsi d'acqua per lo più da adibire a casse di espansione e aree di laminazione per lo scolmo delle piene.*

La Figura 13.1 mostra, appunto, la massima area inondabile per un evento di piena con T_R pari a 30 anni lungo il F. Basento: la particolare morfologia della zona, ben descritta dalla griglia di risoluzione 5 m, impedisce all'inondazione di propagarsi in destra idrografica favorendone, invece, il suo allontanamento verso il F. Bradano.

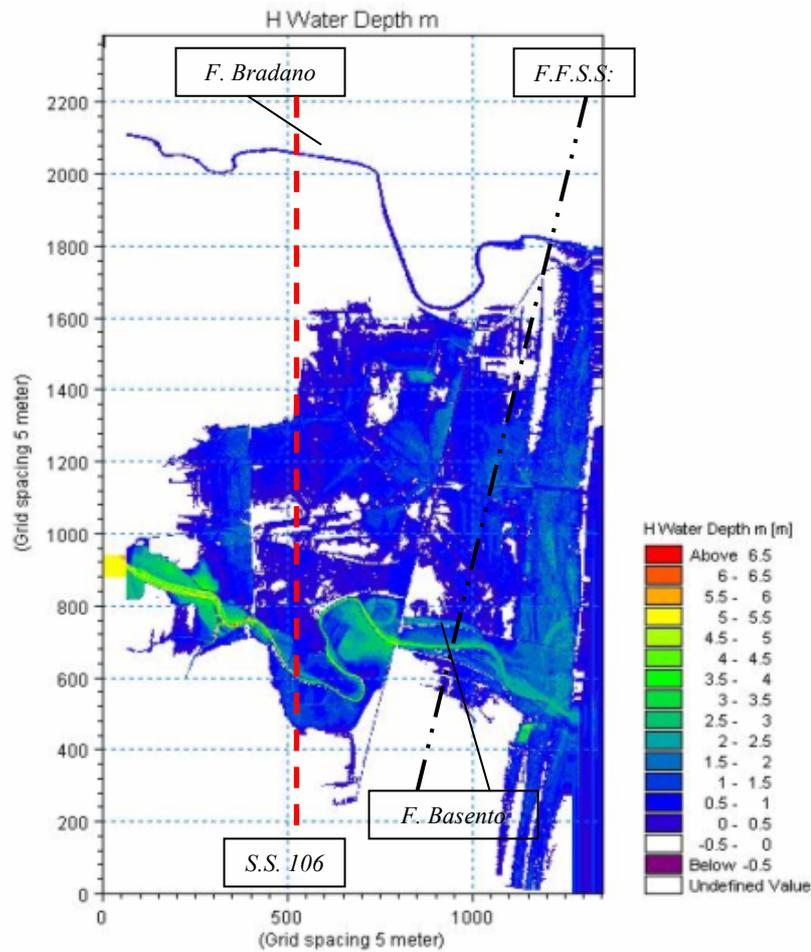


Figura 13.1 Risultati della simulazione bidimensionale con il software MIKE 21 HD per l'evento di piena del F. Basento con tempo di ritorno T_R di 30 anni. Si noti come l'area inondabile ha un limite ben definito in destra idrografica mentre, in sinistra, raggiunge addirittura il F. Bradano. Risoluzione geometrica della griglia pari a 5 m.

Quando si considera un evento di piena lungo il F. Basento con tempo di ritorno T_R di 200 anni si ottiene un modesto incremento dell'estensione dell'area allagabile (Figura 13.2).

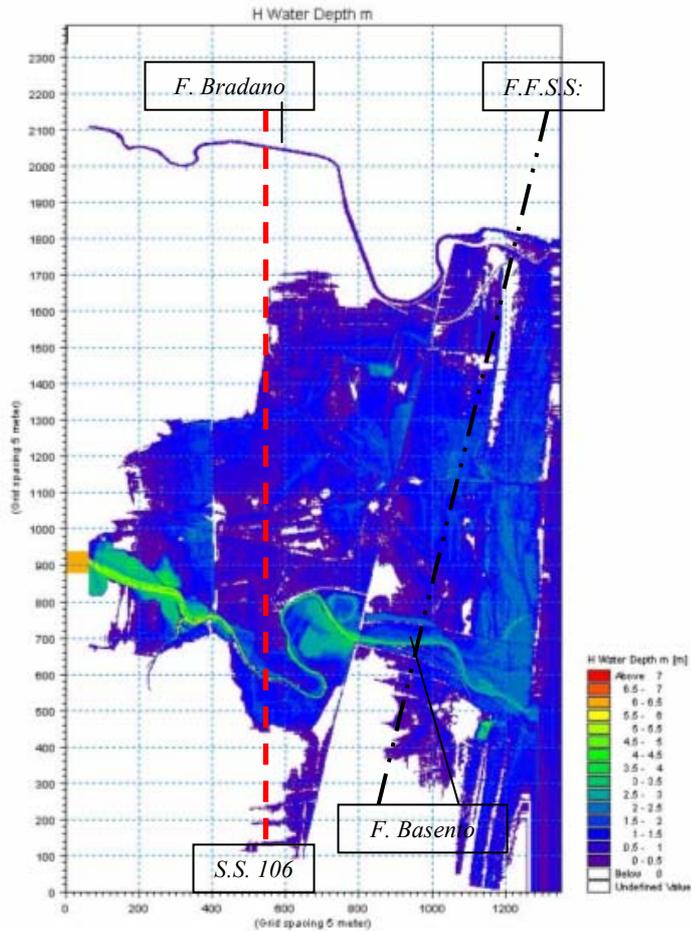


Figura 13.2. Risultati della simulazione bidimensionale con il software MIKE 21 HD per l'evento di piena del F. Basento con tempo di ritorno T_R di 200 anni. Si noti come l'area inondabile ha un limite ben definito in destra idrografica mentre, in sinistra, raggiunge addirittura il F. Bradano. Risoluzione geometrica della griglia pari a 5 m.

Un'ulteriore valutazione è stata realizzata considerando due eventi di piena contemporanei lungo i fiumi Basento e Bradano ciascuno con periodo di ritorno T_R pari a 30 anni e durata pari a 26 ore. La Figura 13.3 mostra, nello specifico, l'area inondabile riferita a due istanti temporali distinti: 5 e 16 ore.

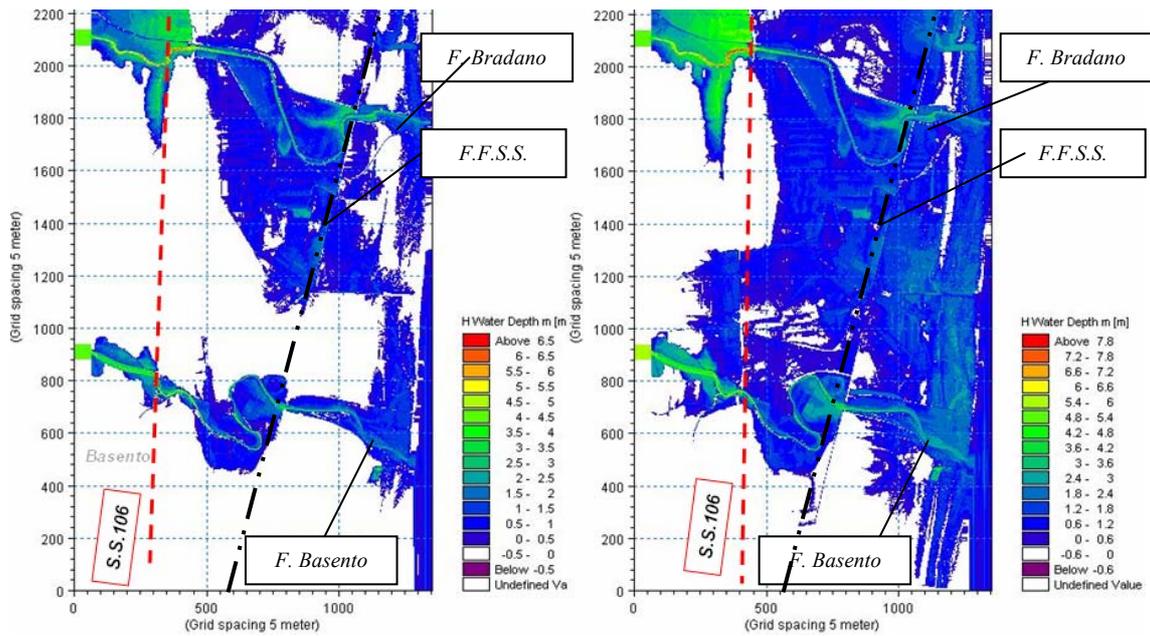


Figura 13.3. Risultati della simulazione bidimensionale con il software MIKE 21 HD per due eventi di piena contemporanei sul F. Basento e sul F. Bradano ciascuno con tempo di ritorno T_R di 30 anni e durata 26 ore. Risoluzione geometrica della griglia pari a 5 m. Area inondabile dopo 5 ore a sinistra e area inondabile dopo 15 ore a destra.

14. PROPOSTA DI PERIMETRAZIONE

I risultati ottenuti dalle simulazioni idrodinamiche bidimensionali mostrano come, già per eventi di piena con periodo di ritorno T_R di 30 anni, l'area allagabile dei fiumi studiati sia significativamente estesa. Questo accade anche in assenza di eventi di piena contemporanei sui corsi d'acqua.

Estendendo quanto riscontrato agli altri tre fiumi lucani che sfociano nel Mar Jonio (Cavone, Agri e Sinni) si può ragionevolmente considerare a rischio di inondazione gran parte del territorio che dalla S.S. 106 jonica giunge fino a mare.

14.1. LE ATTUALI PRESCRIZIONI NELLE ARRE A RISCHIO DI INONDAZIONE

Le Autorità di Bacino presenti sul territorio nazionale tutelano le aree a rischio di inondazione attraverso la redazione e adozione di specifiche norme di uso e di trasformazione dei suoli.

Le *Norme di Attuazione del PAI Basilicata*, all'art. 7, individuano le modalità di gestione e di trasformazioni delle fasce di territorio di pertinenza fluviale cioè quelle aree con probabilità di inondazione corrispondente a piene con tempi di ritorno fino a 30 anni, fino a 200 anni e, in ultimo, fino a 500 anni. Tra le prescrizioni, elencate al comma 4, a cui sono sottoposte tali aree si legge:

“

b) non è consentita la realizzazione di nuovi manufatti edilizi, il deposito e lo stoccaggio di materiali di qualsiasi genere;

.....

f) non è compatibile con la pericolosità delle fasce di pertinenza dei corsi d'acqua ogni tipo di manufatto a carattere permanente o temporaneo che consenta la presenza anche notturna di persone (esempio campi nomadi, campeggi ed iniziative similari);

.....

h) nelle aree comprese tra la fascia con probabilità di inondazione corrispondente a piene con tempi di ritorno fino a 30 anni e quella corrispondente a 500 anni sono consentite:

- *h1) attività di tempo libero compatibili con la pericolosità idraulica della zona, che non comportino edificazione o riduzione della funzionalità idraulica,.....*
- *i) nelle aree comprese tra la fascia con probabilità di inondazione corrispondente a piene con tempi di ritorno fino a 200 anni e quella corrispondente a 500 anni, sono consentiti interventi che non comportino la realizzazione di nuovi volumi o riduzione della funzionalità idraulica,.....;*
- *l) relativamente ai manufatti esistenti sono consentiti i seguenti interventi a condizione che gli stessi non aumentino il livello di rischio comportando significativo ostacolo al deflusso o riduzione apprezzabile della capacità di invaso delle aree stesse e non precludano la possibilità di eliminare le cause che determinano le condizioni di rischio:*
 - *l1) gli interventi di demolizione senza ricostruzione;*
 - *l2) gli interventi di manutenzione ordinaria;*
 - *l3) gli interventi di manutenzione straordinaria;*
 - *l4) gli interventi di restauro e risanamento conservativo;*
 - *l5) gli interventi di manutenzione e consolidamento delle infrastrutture pubbliche o di interesse pubblico, purchè non concorrano ad incrementare il carico insediativi e non precludano la possibilità di attenuare o eliminare le cause che determinano le condizioni di rischio;*
 - *l6) gli interventi di riparazione e miglioramento sismico*
- m) relativamente ai manufatti edilizi esistenti, esclusivamente nelle aree comprese tra la fascia con probabilità di inondazione corrispondente a piene con tempi di ritorno fino a 200 anni e quella corrispondente a 500 anni, sono consentiti i seguenti interventi a condizione che gli stessi non aumentino il livello di rischio comportando significativo ostacolo al deflusso o riduzione apprezzabile della capacità di invaso delle aree stesse e non precludano la possibilità di eliminare le cause che determinano le condizioni di rischio:*
 - *m1) gli interventi di ampliamento degli edifici esistenti unicamente per motivate necessità di adeguamento igienico-sanitario purchè siano compatibili con le condizioni di rischio che gravano sull'area;*

- *m2) cambiamenti di destinazione d'uso che non comportino aumento delle condizioni di rischio.*

14.2. LA MODIFICA PROPOSTA

Secondo quanto scritto finora, la delimitazione delle aree inondabili realizzata nel rispetto degli attuali criteri indicati nel PAI Basilicata, si traduce di fatto nella impossibilità di trasformazione per gran parte della fascia jonica lucana. Questo in netto contrasto con la dinamicità di un territorio che può essere considerato il più produttivo dell'intera regione viste le numerose attività turistiche ed agricole insediate.

Il lavoro descritto si conclude, pertanto, con una proposta di modifica degli attuali criteri di perimetrazione finalizzata a consentire, seppur entro certi limiti, alcuni usi e trasformazioni dei luoghi. Tale proposta muove dalla constatazione che le aree a rischio di allagamento a valle della S. S. 106 jonica, sebbene significativamente estese, sono caratterizzate da bassi valori della velocità della corrente e da tiranti che variano generalmente tra 0 e 1.5 m circa.

Nel caso di due eventi contemporanei sui Fiumi Bradano e Basento ciascuno con tempo di ritorno T_R di 30 anni, per esempio, l'inondazione dell'area compresa tra i due corsi d'acqua avviene con valori della velocità della corrente sempre inferiori a 0.3 m/s. Il tirante, invece, varia in un range più ampio che va da 0 a circa 1.5 m.

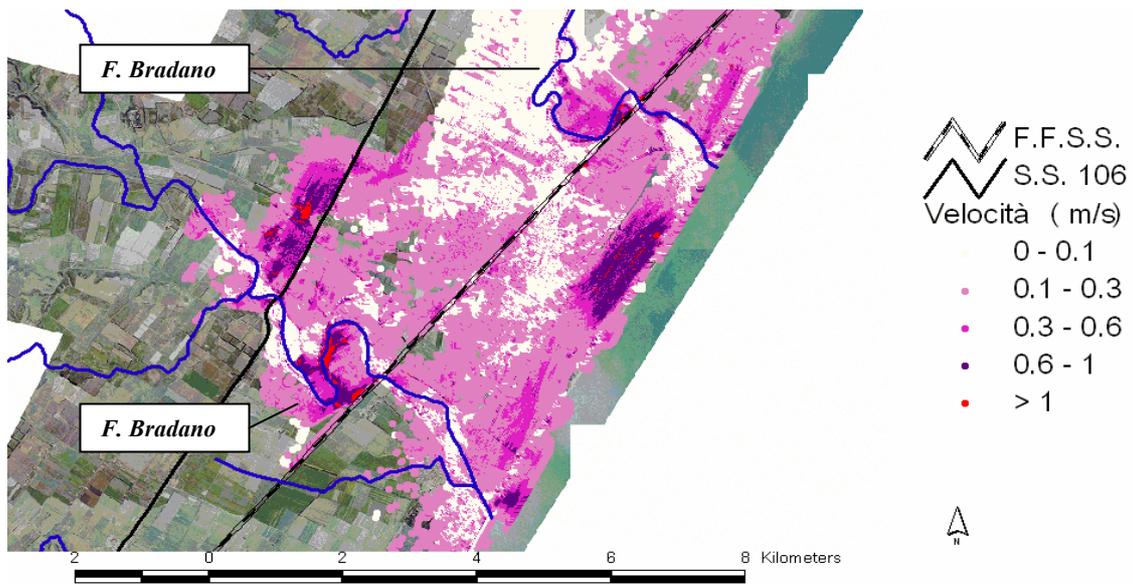


Figura 14.1. Risultati della simulazione bidimensionale ottenuti con il software MIKE 21 HD per due eventi di piena contemporanei sul F. Basento e sul F. Bradano ciascuno con tempo di ritorno T_R di 30 anni e durata 26 ore. Risoluzione geometrica della griglia pari a 5 m. Velocità della corrente.

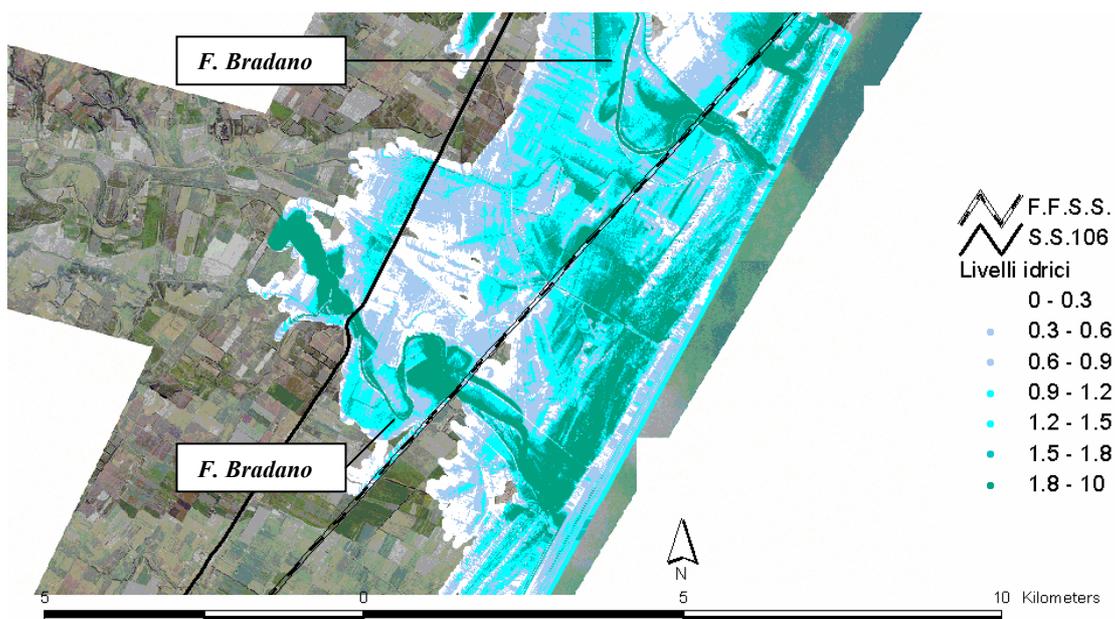


Figura 14.2. Risultati della simulazione bidimensionale ottenuti con il software MIKE 21 HD per due eventi di piena contemporanei sul F. Basento e sul F. Bradano ciascuno con tempo di ritorno T_R di 30 anni e durata 26 ore. Risoluzione geometrica della griglia pari a 5 m. Area inondabile massima.

Conseguentemente si ritiene ragionevole modificare l'attuale definizione delle tre aree di pertinenza fluviale (ad elevata, a moderata e a bassa frequenza di inondazione) fornita dall'AdB sulla base della sola dipendenza di ciascuna area con il tempo di ritorno T_R di un evento di piena. Si ritiene che una adeguata

alternativa possa essere quella di individuare le tre aree di pertinenza fluviale facendo riferimento anche al tirante massimo raggiunto in occasione di un evento di piena con dato tempo di ritorno T_R , riproponendo, per certi versi, l'esperienza di altre Autorità di Bacino (come quella dell'Arno).

Si potrebbero, per esempio, considerare al più le tre classi di tirante di seguito elencate:

- a) $0 \text{ m} < h \leq 0.3 \text{ m}$;
- b) $0.3 \text{ m} < h \leq 0.6 \text{ m}$;
- c) $h > 0.6 \text{ m}$.

e definire i diversi livelli di pericolosità in funzione della combinazione tra evento di piena con prefissato periodi di ritorno e tirante registrato. Si potrebbe, per esempio, pensare ai quattro livelli di pericolosità definiti nella Tabella 14.1:

- P.I. 1 pericolosità idraulica moderata;
- P.I. 2 pericolosità idraulica media;
- P.I. 3 pericolosità idraulica elevata;
- P.I. pericolosità idraulica molto elevata.

Tempo di ritorno T_R (anni)	$0 < h \leq 0.3$ (m)	$0.3 < h \leq 0.6$ (m)	$h > 0.6$ (m)
$0 < T_R \leq 30$	P.I. 3 Elevata	P.I. 4 Molto elevata	P.I. 4 Molto elevata
$30 < T_R \leq 200$	P.I. 2 Media	P.I. 3 Elevata	P.I. 4 Molto elevata
$200 < T_R \leq 500$	P.I. 1 Moderata	P.I. 2 Media	P.I. 4 Elevata

Tabella 14.1. Proposta di classificazione delle aree a differente pericolosità idraulica

Nella Figura 14.3 è mostrato uno stralcio di ortofotocarta con individuazione delle aree inondabili con differente livello idrico in corrispondenza del Fiume Basento. La simulazione è stata realizzata con il software MIKE 21 HD considerando due eventi contemporanei sui Fiumi Basento e Bradano ciascuno con tempo di ritorno T_R di 30 anni e, come condizione al contorno di valle, il livello medio del mare pari a 1 m.

I livelli idrici maggiori si riscontrano, oltre che nelle aree più prossime al corso d'acqua, immediatamente a monte dei rilevati stradale (S.S. 106 jonica) e ferroviario.

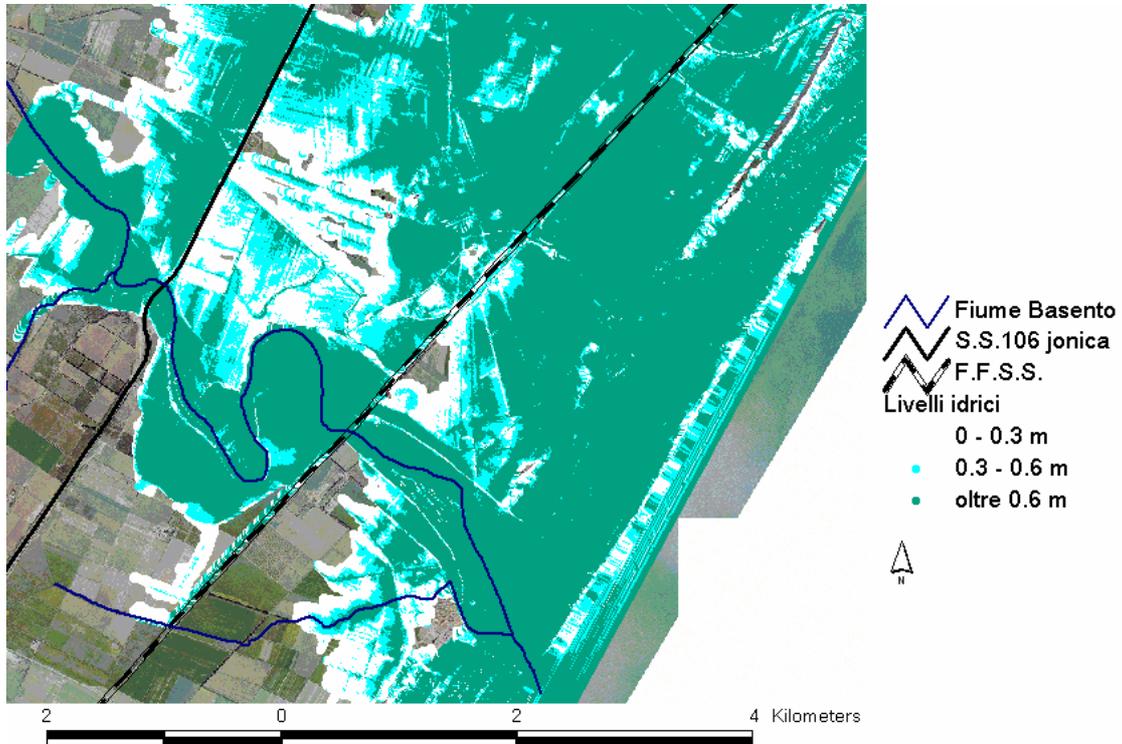


Figura 14.3. Esempio di aree inondabili con differenti valori di livello idrico in corrispondenza del Fiume Basento. Risultati della simulazione bidimensionale con il software MIKE 21 HD per due eventi di piena contemporanei sul F. Basento e sul F. Bradano ciascuno con tempo di ritorno T_R di 30 anni e durata 26 ore. Risoluzione geometrica della griglia pari a 5 m.

15. CONCLUSIONI

La valutazione delle aree esposte al pericolo di alluvione rappresenta un problema di grande complessità viste le incertezze di determinazione dovute alle semplificazioni che necessariamente le accompagnano.

Con la presente ricerca si è tentato di rispondere all'esigenza dell'AdB di Basilicata di definire un approccio metodologico adeguato per la determinazione di una corretta estensione delle aree inondabili, adeguati valori delle altezze idriche della corrente per i diversi eventi simulati in un'area particolarmente sensibile del suo territorio: la fascia jonica a valle della S.S: 106 in corrispondenza dei Fiumi Basento e Bradano. Qui i due corsi d'acqua assumono le tipiche caratteristiche degli alvei incassati di pianura.

Lo studio è stato affrontato ricorrendo sia a metodi speditivi che a modelli dinamici di propagazione delle piene.

Per quel che riguarda i metodi speditivi, l'applicazione di un metodo "*DEM-based*", ha evidenziato la possibilità di correlare il pericolo di inondazione ad alcune grandezze geomorfologiche (Slope, Aspect, Curvature, Hillshade, Indice Topografico *IT* e Indice Topografico modificato *ITm*) individuando legami diversi in funzione della morfologia fluviale analizzata. Nello specifico e in riferimento proprio ad uno dei due corsi d'acqua studiati nel presente lavoro, il Fiume Basento, tali studi hanno evidenziato una netta differenza di comportamento dei tratti Alto e Medio Basento da quello definito Basso Basento che attraversa la piana costiera. Il rischio di allagamento risulta generalmente influenzato dalla pendenza e dagli Indici *IT* e *ITm*. Nel dettaglio:

- per l'Alto Basento, la dipendenza dall'*IT* appare maggiore della dipendenza dalla pendenza;
- per il Medio Basento, si osserva una dipendenza maggiore dalla pendenza;
- per il Basso Basento, infine, non è stato possibile rinvenire alcuna legame tra l'Indice Topografico *IT* e le caratteristiche geomorfologiche considerate.

In riferimento all'Indice Topografico modificato *ITm*, inoltre, si è proceduto ad individuare il valore dell'esponente n dell'area contribuente che compare nella (5.2) che minimizza sia l'errore nella stima delle aree allagabili sia l'errore di sovrastima lungo i tre macrotratti morfologici del Fiume Basento ottenendo i seguenti valori:

- $n = 0.3$ per l'Alto Basento con valore soglia *ITs* pari a 0.25;
- $n = 0.2$ per il Medio Basento con valore soglia *ITs* pari a 0.25;
- per il Basso Basento, infine, l'errore totale calcolato risulta notevolmente elevato e tra questi quello minore si ha per $n = 0.2$ con un valore soglia 1.50.

In corrispondenza del Basso Basento, non si riesce a cogliere nessun legame tra le grandezze geomorfologiche considerate e il pericolo di inondazione. Questo sia perché le pendenze sono molto basse sia perché, come già osservato, l'*ITm* non è uno strumento adeguato per la valutazione del pericolo di inondazione lungo aree estremamente pianeggianti, quale l'area oggetto di studio. Alla luce dei risultati ottenuti attraverso l'uso del metodo speditivo descritto, si desume come la specificità delle aree che insistono nel Basso Basento (e in generale in tutta la costa jonica) imponga una valutazione basata su rilievi di dettaglio capaci di descrivere accuratamente la morfologia della zona.

Lo studio delle aree inondabili con modelli dinamici è svolto facendo riferimento sia a tecniche di rilevamento tradizionale (per esempio al rilievo topografico di sezioni trasversali lungo i corsi d'acqua) sia a moderni sistemi di acquisizione in continuo delle caratteristiche geometriche e morfologiche (rilievi aerofotogrammetrici, laser, scanner e immagini telerilevate). In particolare i modelli digitali altimetrici del terreno ottenuti dal rilievo laser-scan consentono di superare i limiti imposti dall'utilizzo della vecchia cartografia nello studio dei caratteri morfologici della pianura costiera lucana.

Si è innanzitutto verificata la capacità del DTM (*Digital Terrain Model*) ottenuto dal rilievo laser-scan, eseguito nel 2006 per conto dell'AdB di Basilicata, di fornire informazioni adeguate all'implementazione dei modelli matematici mono e bidimensionali utilizzati. Si tratta di un particolare DTM definito MKP (*Model Key Points*. Il MKP) leggero e gestibile anche con hardware poco potenti perché, diradando la nuvola di punti sulle zone omogenee e conservando un opportuno

infittimento in corrispondenza delle discontinuità del terreno, permette una facile visualizzazione della morfologia del territorio.

A partire dal TIN generato dal MKP e, lavorando in ambiente GIS, sono state estratte otto sezioni trasversali aventi la stessa posizione ed estensione di quelle rilevate in situ e sono state confrontate le quote dell'incisione principale e del floodplain. Dai risultati ottenuti si evince che, generalmente, il canale principale estratto dal MKP fornisce una quota di fondo significativamente più alta (mediamente di 1.17 m) di quella rilevata in situ. Questo a causa della riflessione competitiva che subisce il raggio elettromagnetico nell'infrarosso utilizzato dal laser scanner quando investe gli specchi d'acqua.

Per quel che concerne il floodplain e gli elementi naturali e non su di esso presenti, il MKP fornisce, senza ombra di dubbio un dettaglio maggiore. Pertanto, per la caratterizzazione morfologica necessaria alle valutazioni sulla propagazione dell'onda di piena si farà riferimento:

- ai rilievi in situ per l'acquisizione delle informazioni sul canale principale dei corsi d'acqua considerati;
- al modello digitale del terreno MKP per ricavare tutte le informazioni relative al floodplain e agli elementi su di esso presenti (rilevati stradali, argini,..) in termini di posizione, di estensione, continuità e di quota.

La individuazione delle aree inondabili è stata effettuata ricorrendo alla modellistica numerica sia mono che bidimensionale verificando la maggiore efficacia dei modelli 2D di scrivere il fenomeno della propagazione della piena in un'area estremamente pianeggiante come quella in esame.

La modellazione bidimensionale è stata realizzata con l'ausilio di due differenti software (FLO-2D di *J. O'Brein* e MIKE 21 HD del *Danish Hydraulic Institute*), mentre quella monodimensionale con il modello implementato dal sistema HEC-RAS sviluppato presso *l'Hydrologic Engineering Center, dall'United States Army Corps of Engineers*. Il confronto dei risultati ottenuti, in termini di massima area inondabile e di tirante, mostra una netta differenza tra le simulazioni mono e bidimensionali per tutti gli eventi di piena considerati: la massima area inondabile ottenuta dal modello monodimensionale appare minore di quella relativa alla simulazione 2D ed i tiranti 1D sono significativamente più alti di quelli 2D.

Per quel che riguarda il confronto tra i due software 2D, essi forniscono risultati comparabili sia in riferimento all'estensione delle aree inondabili che ai valori di tiranti e velocità della corrente. Tuttavia i tempi di simulazione sono sensibilmente diversi e tale differenza risultando il FLO-2D decisamente più lento del MIKE 21 HD. Dal momento che tale differenza si accentua all'aumentare della risoluzione geometrica della griglia di calcolo, si ritiene che il FLO-2D, trova ragionevole applicazione solo in assenza di schematizzazioni con griglie di calcolo ad elevata risoluzione.

I risultati delle simulazioni numeriche bidimensionali relativi a griglie di calcolo a differente risoluzione geometrica (40 m, 60 m, 80 m e 100 m), espressi in termini di area inondabile massima e area inondabile per fissato tirante, sono stati analizzati mediante un indice prestazionale (*Horritt & Bates, 2002*) frequentemente utilizzato nella calibrazione e verifica di modelli di allagamento:

$$P = \frac{A_{sim} \cap A_{oss}}{A_{sim} \cup A_{oss}} \quad (15.1)$$

dove A_{sim} e A_{oss} rappresentano rispettivamente i valori di area inondata risultante dalla simulazione attraverso il modello numerico e dell'area osservata. In realtà, mancando informazioni di eventi di piena realmente verificatisi e compatibili con l'evento simulato, per tutti i confronti effettuati si è considerata come A_{oss} quella di un maggiore dettaglio relativa alla risoluzione di 40 m. Esiste un'accettabile vicinanza del perimetro delle massime aree inondabili per risoluzioni di 100 m, 80 m e 60 m a quello relativo alla risoluzione 40 m visto che l'*indice prestazionale P* risulta sempre maggiore di 0.90 per le simulazioni effettuate con il FLO-2D e maggiore di 0.80 per quelle con il MIKE 21 HD.

Per le valutazioni sulle aree inondabili con diverso tirante si è fatto riferimento ai soli risultati ottenuti con il FLO-2D considerando i quattro intervalli di altezza idrica di seguito indicati:

- $h \leq 0.30$ m;
- $0.30 \text{ m} \leq h \leq 0.60$ m;
- $0.60 \text{ m} \leq h \leq 0.90$ m;

- $0.90 \text{ m} \leq h \leq 1.20 \text{ m}$.

Si nota, in questo caso, una marcata differenza tra i valori assunti dall'*indice prestazionale P* per l'intervallo $0.90 \text{ m} \leq h \leq 1.20 \text{ m}$ rispetto a quello degli altri tre intervalli. Questo a conferma del fatto che i tiranti maggiori si registrano, per qualsiasi dimensione di cella considerata, nella porzione di territorio confinata al solo intorno dell'alveo fluviale. Gli areali relativi agli altri tre intervalli di tirante, generalmente distribuiti sul *floodplain*, sono caratterizzati da un *indice prestazionale P* sempre minore di 0.6 e crescente col diminuire della dimensione della cella.

I risultati ottenuti dalle simulazioni idrodinamiche bidimensionali mostrano come, già per eventi di piena con periodo di ritorno T_R di 30 anni, l'area allagabile dei fiumi studiati sia significativamente estesa. Questo accade anche in assenza di eventi di piena contemporanei sui corsi d'acqua. Estendendo quanto riscontrato agli altri tre fiumi lucani che sfociano nel Mar Jonio (Cavone, Agri e Sinni) si può ragionevolmente considerare a rischio di inondazione gran parte del territorio che dalla S.S. 106 jonica giunge fino a mare.

La delimitazione delle aree inondabili realizzata nel rispetto degli attuali criteri indicati nel PAI Basilicata, si traduce di fatto nella impossibilità di trasformazione per gran parte della fascia jonica lucana. Questo in netto contrasto con la dinamicità di un territorio che può essere considerato il più produttivo dell'intera regione viste le numerose attività turistiche ed agricole insediate.

Il lavoro descritto si conclude, pertanto, con una proposta di modifica degli attuali criteri di perimetrazione finalizzata a consentire, seppur entro certi limiti, alcuni usi e trasformazioni dei luoghi. Si ritiene ragionevole, infatti, modificare l'attuale definizione delle tre aree di pertinenza fluviale (ad elevata, a moderata e a bassa frequenza di inondazione) fornita dall'AdB sulla base della sola dipendenza di ciascuna area con il tempo di ritorno T_R di un evento di piena. Un'adeguata alternativa può essere quella di individuare le tre aree di pertinenza fluviale facendo riferimento anche al tirante massimo raggiunto in occasione di un evento di piena con dato tempo di ritorno T_R . Si potrebbero, per esempio, considerare al più le tre classi di tirante di seguito elencate:

- d) $0 \text{ m} < h \leq 0.3 \text{ m}$;
- e) $0.3 \text{ m} < h \leq 0.6 \text{ m}$;
- f) $h > 0.6 \text{ m}$.

e definire i diversi livelli di pericolosità in funzione della combinazione tra evento di piena con prefissato periodi di ritorno e tirante registrato.

Quanto descritto nel presente lavoro ha interessato alcuni aspetti dell'applicazione della modellistica numerica bidimensionale a partire da informazioni desunte dal DTM laser.scan. Tra i diversi approfondimenti che potrebbero essere realizzati si ritengono particolarmente interessanti i seguenti:

- utilizzo di modelli numerici agli elementi finiti per migliorare la schematizzazione di aree descritte dal MKP. Tali modelli, discretizzando il dominio di calcolo mediante elementi di forma e dimensioni arbitrarie (quadrilateri e triangoli) consentirebbero di esaltare le qualità di un modello digitale del terreno, MKP appunto, caratterizzato da un numero di punti maggiore in corrispondenza delle discontinuità del terreno;
- caratterizzazione del coefficiente di scabrezza n di Manning in funzione delle informazioni desunte dal rilievo laser-scan e riguardanti la presenza di vegetazione bassa o alta e attribuzione dei diversi valori rinvenuti agli elementi che definiscono il dominio di calcolo dei modelli utilizzati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ackermann F., *Airborne laser scanning—present status and future expectations*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54, 64–67 (1999).
- [2] Autorità di Bacino Interregionale della Basilicata, *Piano Stralcio per la Difesa dal Rischio Idrogeologico P.A.I.*, Aggiornamento 2007.
- [3] Barkau R.L., “*UNET One dimensional Unsteady Flow trough a full network of open channels user’s manual*”, US Army Corps of Engineerings, Hydrologic Engineerings Center, Davis, (1997).
- [4] Bates P. D., Marks K. J., Horritt M. S., *Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models*. Hydrological Processes, 17, 537-557 (2003).
- [5] Casella V., Galetto R. *Tecniche innovative per il rilevamento terrestre, aereo e da satellite. Atti della 2a Conferenza Nazionale ASITA – Bolzano 24-27– Volume 1 (1998)*.
- [6] Casella V., *Introduction to airborne laser scanning, a GPS-INS based technique* Reports on Geodesy n. 3 (44), 1999, Warsaw University of Technology, pagg. 249-254, ISBN 83-85287-43-4 (1999).
- [7] Casas A., Benito G., Thorndycraft V.R., Rico M., *The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modeling*. Earth Surface Processes and Landforms 31, 444-456 (2006).
- [8] Chow V.T., *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Singapore, (1959).
- [9] Claps, P. & Fiorentino, M., *Rapporto di sintesi sulla valutazione delle piene in Italia – Guida Operativa all’applicazione dei rapporti regionali sulla valutazione delle piene in Italia*. Linea 1 Previsione e Prevenzione degli eventi idrologici estremi. CNR – GNDCI Roma, (1999).
- [10] Claps, P. & Fiorentino, M., *Rapporto di sintesi sulla valutazione delle piene in Italia – Guida Operativa all’applicazione dei rapporti regionali sulla valutazione delle piene in Italia*. Linea 1 Previsione e Prevenzione degli eventi idrologici estremi. CNR – GNDCI Roma, 1999.
- [11] Consiglio dell’Unione Europea, *Proposta di direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvione*, Risultati della seconda lettura del Parlamento europeo, Strasburgo, 23-26 aprile 2007.
- [12] DHI Software, Mike 21 version 2004 - General Reference manual, Scientific Background, Danish Hydraulic Institute., (2004).
- [13] Di Baldassarre G., Castellarini A., Brath A., Horritt M., Bates, *Modellistica idraulica monodimensionale: alcune considerazioni applicative sul grado di dettaglio ottimale della descrizione topografica*. XXX° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche – IDRA 2006.
- [14] Dyhouse, G., Hatchett, J.& Benn, J., *Floodplain Modeling Using HECRAS (first edition)*, eds. Klotz D., Strafaci A., Hogan A., Dietrich K., Haestad Methods, (2005).
- [15] Ferrucci E. M. e Pistocchi A., *Le analisi idrologico-idrauliche per la pianificazione di bacino*, Ambiente e Territorio, Regione Emilia Romagna e Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, Maggioli Editore, (2004).
- [16] Fiorentino M. e Margiotta M.R. *La valutazione dei volumi di piena e il calcolo semplificato dell’effetto di laminazione dei grandi invasi*, in “*Tecniche per la difesa dall’inquinamento*” edito da G. Frega, BIOS 203-222, (1998).
- [17] Frank E., Montoya M. & Fattorelli S., *Effect of topografic data resolution and spacial model resolution on a bi-dimensional hydro-morfological model*. River Basin Management IV, C.A. Brebbia & K.L. Katsifarakis, WIT Press Southampton UK, 325-334 (2007).

- [18] French J. R., *Airborne lidar in support of geomorphological and hydraulic modeling*. Earth Surface Processes and Landforms 28, 321-335 (2003).
- [19] Gallant J. C., Bowling T. I., *A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas*. Water Resources Reserch, 39, No 12, 1347, 2003.
- [20] GEOCART s.r.l., *Appalto concorso a procedura ristretta per l'affidamento del servizio di produzione di un modello digitale del terreno di precisione ottenuto con tecnologie laser-scan e di ortofoto* Relazione tecnica, (2006).
- [21] Giuzio L., Tesi si laurea in Modelli e GIS per l'Ambiente, *Utilizzo di tecniche GIS per la delineazione di aree di inondazione: approfondimento sullo sviluppo di un metodo geomorfologico applicato al bacino del Fiume Basento*. Relatori: prof. ing. A. Sole, ing. S. Manfreda. (2007).
- [22] GNDCI Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche (<http://www.gndci.pg.cnr.it/>).
- [23] Guariglia, A., *Rilievo e analisi di dati multi-sorgente per il monitoraggio la valutazione dell'evoluzione costiera: il caso del litorale ionico lucano*, Degree Thesis. Engineering Faculty, University of Basilicata, Potenza, (2006).
- [24] Kirkby M. J., *Hydrograph modeling strategies* in Progressin Physical and Human Geography, edited by: R. F. Peel, M. D. Chisholm, and P. Haggett, Heinemann, London, 1975, 69-90.
- [25] Lane S. N, James T. D., Pritchard H., Saunders M., *Photogrammetric and laser altimetric reconstruction of water levels for extreme flood event analysis*. Photogrammetric Record, 18(104): 293-307 (2003).
- [26] HEC-RAS *User Manual*. Version 3.1 Hydrologic Engineering Center, United States Army Corps of Engineers, Novembre (2002).
- [27] HEC-RAS *Hydraulic Reference*. Hydrologic Engineering Center, United States Army Corps of Engineers, Novembre (2002).
- [28] Horritt, M. S. & Bates, P.D. *Effect of special resolution on a raster based model of flood flow*. Hydrological Processes, 253, 239-249 (2001).
- [29] Horritt, M. S. & Bates, P.D. *Predicting floodplain inundation: raster-based modeling versus the finite-element approach*. Hydrological Processes, 15, 825-842 (2001).
- [30] Horritt, M. S. & Bates, P.D. *Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation*. *Journal of Hydrology* 268, 87-99 (2002).
- [31] Manfreda S., A. Sole, M. Fiorentino, *Valutazione del pericolo di allagamento sul territorio nazionale mediante un approccio di tipo geomorfologico*, l'Acqua, n.4, pp.43-54, (2007).
- [32] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e Ministero dell'Economia e delle Finanze, *Metodologie e linee guida per la prevenzione ed il controllo del rischio idrogeologico. Rischio idraulico: perimetrazione e classificazione delle aree a rischio di inondazione*, PODIS Progetto Operativo Difesa del Suolo, (2006).
- [33] Nardi F., Vivoni E. R., Grimaldi S., *Investigatine a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method*. Water Resources Reserch, 42, W09409, (2006).
- [34] NERC (National Environmental Research Council), *Flood Studies Report*, Vol. I, London, 1975.
- [35] O'Brien J. *FLO-2D User Manual*. Version 2007.06.
- [36] Rosgen, D., *Applied River Morphology*. Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado, (1996).

- [37] Rossi, F., Fiorentino, M. & Versace, P., *Two Component Extreme Value Distribution for Frequency Analysis*. Water Resources Research 20 (7), 847-856, (1984).
- [38] Silvani G., *Valutazione dei massimi deflussi di piena*, Pubbl. Ist. Idraulica n. 489, Univ. di Napoli, (1984).
- [39] Sole A & Zuccaro, G., Comparison between open channel flow models in natural rivers, *River Basin Management II*, ed C.A. Brebbia, WIT Press Southampton UK, pp.66-76, (2003).
- [40] Sole A., Giosa L., Copertino V., 2006, *Risk flood areas, a study case: Basilicata Region*, River Basin Management IV, C.A. Brebbia & K.L. Katsifarakis, WIT Press Southampton UK, 325-334, (2007).
- [41] Viparelli C., *Corsi d'acqua naturali e leggi che ne regolano il modellamento*, Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli, Istituto di Costruzioni Idrauliche: bonifiche e irrigazioni, Quaderno n. 4, (1972).
- [42] Williams W. A., Jensen M. E., Winne J. C., Redmond R. L., *An Automated Technique for Delineating and Characterizing Valley-Bottom Settings*, Environmental Monitoring and Assessment, 64(1), 2000.