



INDICE

INTRODUZIONE.....	3
CAPITOLO 1 CONTROLLO IN TEMPO REALE DEI SISTEMI IDROLOGICI. 6	
1.1 INTRODUZIONE.....	6
1.2 RACCOLTA DEI DATI.....	8
1.2.1 Topografia.....	9
1.2.2 Precipitazioni.....	10
1.2.3 Portata.....	11
1.2.4 Umidità del suolo.....	12
1.2.5 Acque sotterranee al di sotto della zona vadosa.....	13
1.2.6 Evapotraspirazione.....	13
1.3 MODELLI IDROLOGICI.....	14
1.3.1 Modelli di pioggia.....	14
1.3.2 La generazione del deflusso.....	15
1.3.3 Modelli di scioglimento nivale.....	17
1.3.4 Modelli afflussi deflussi.....	17
1.4 I GIS.....	18
1.4.1 Archiviazioni dei dati.....	18
1.4.2 GIS e Modelli Idrologici.....	19
1.4.3 GIS e problemi di scala.....	21
CAPITOLO 2 MODELLI IMPLEMENTATI.....	23
2.1 MODELLO GEOMORFOLOGICO.....	24
2.1.1 Che cos'è una piena	24
2.1.2 Come si forma una piena.....	25
2.1.3 I modelli di piena per tempi di residenza.....	28
2.1.3.1 Introduzione.....	28
2.1.3.2 Equivalenza di portate specifiche e distribuzione dei tempi di residenza.....	29
2.1.3.3 Descrizione geometrica del bacino: il modello geomorfologico.....	31
2.1.3.4 Un modello semplice per il calcolo dei tempi di residenza nei versanti.....	32
2.1.3.5 I tempi di residenza nella rete idraulica.....	33
2.2 MODELLO IDRODINAMICO.....	36
2.2.1 Introduzione.....	36
2.2.2 Schema alle differenze finite.....	38
2.2.3 Condizioni al contorno.....	42
2.2.4 Il codice di calcolo.....	43
2.2.5 Files di input e output.....	49
2.2.6 Dal modello unidimensionale a quello bidimensionale.....	51
CAPITOLO 3 CASO DI STUDIO.....	52
3.1 IL BACINO DEL TORRENTE NERVIA.....	52
3.1.1 Ubicazione.....	52
3.1.2 Sistema fisico.....	54
3.1.2.1 Caratteristiche morfologiche.....	54
3.1.2.2 Assetto geologico e litologia superficiale.....	57
3.1.2.3 Copertura vegetale.....	61

3.1.3 Sistema antropico.....	64
3.1.3.1 Sviluppo dell'assetto territoriale.....	64
3.1.3.2 Situazione socio-economica.....	67
3.1.3.3 Uso del suolo.....	78
3.1.3.4 Le alluvioni	80
3.2 SIMULAZIONI.....	83
3.2.1 La curva di portata.....	83
3.2.2 Propagazione dell'onda di piena.....	87
CAPITOLO 4 CONCLUSIONI.....	92
ALLEGATI.....	94
A NORMATIVA.....	94
<i>LEGGE N°183/1989</i>	94
<i>LEGGE REGIONALE N° 9/1993 e successive modifiche</i>	96
<i>LEGGE REGIONALE N. 45/1994</i>	97
<i>MAPPATURA DELLE AREE INONDABILI</i>	99
B FILE DI INPUT.....	102
C FILE DI OUTPUT.....	106
BIBLIOGRAFIA.....	110

INTRODUZIONE

Questa tesi si propone di analizzare la possibilità di costruire un sistema informatico integrato in grado di mantenere controllato il territorio da un punto di vista idrologico e rendere quindi possibili delle politiche di prevenzione del rischio idraulico e l'approntamento di opportuni piani. Benché sin dagli anni settanta sia gli organismi competenti degli Stati Uniti che ricercatori europei si siano adoperati a questo fine, solo ora comincia ad essere consistente il corpo di strumenti, risorse e conoscenze idrologiche che rendono possibile l'implementazione di un simile sistema.

Le conoscenze e le tecnologie necessarie per il raggiungimento di questo scopo sono descritte in sintesi nel capitolo 1. Schematicamente esso si può comporre di tre parti: una parte di acquisizione e validazione dei dati necessari, una parte di modellazione ed una parte di rappresentazione.

Allo stato dell'arte non esiste un prodotto informatico e modellistico in grado di contenere in sé la soluzione a tutti i problemi posti. Le applicazioni devono essere studiate ad una ad una in base alle esigenze specifiche alle quali si rivolge, alle scale temporali analizzate e alle necessità operative.

All'interno di un così complesso sistema, che per sua natura richiede una stretta collaborazione di diverse professionalità, l'Ingegnere per l'Ambiente e il Territorio può rivestire diversi ruoli. Nella fase di progettazione e sviluppo del sistema di previsione la formazione intersettoriale, che dovrebbe spaziare dalla modellistica idrologica ai sistemi di rilevamento, fa dell'ing.



Ambientale il candidato ideale al ruolo di coordinatore: si tratta di un esperto che, non necessariamente specialista in tutti i settori, sia in grado di guidare le scelte nei vari sottosistemi tenendo presenti sia le problematiche specifiche che le necessità generali.

Un elemento critico di questi sistemi è l'uso di modelli idrologici. Benché le conoscenze accumulate in campo idrologico si siano grandemente accresciute, l'applicazione di studi di laboratorio e di analisi teoriche a casi reali come standard richiede un salto di qualità e il superamento di questioni ancora non sufficientemente chiarite. La presenza di un esperto, l'Ingegnere Ambientale, che può controllare il grado di validità dei modelli è dunque un aspetto che va considerato attentamente. L'ingegnere per l'Ambiente e il Territorio può quindi trovare spazio anche all'interno delle équipes che si occupano della realizzazione dei vari sottosistemi al fianco di ing. Idraulici, fisici, matematici, informatici, topografi, ing. Elettronici.

La nota di prudenza appena scritta non implica necessariamente che se l'obiettivo del modello è orientato ad un singolo utilizzo (per esempio gli allarmi di protezione civile) non si possano implementare soluzioni di rapido uso. Tuttavia, in generale l'utilizzo di strumenti di questo tipo è tutt'altro che banale e richiede l'impiego di operatori specializzati. L'operatore non deve comunque dimenticare che costituisce una sorta di filtro, che nella fase di interrogazione del sistema, interpreta e indirizza le richieste degli utenti finali in maniera tale che il sistema possa fornire delle risposte adeguate, nella direzione opposta invece il suo compito è quello di controllare l'attendibilità dei risultati e trasmetterli in maniera corretta agli utenti mettendone in evidenza il grado di attendibilità, i limiti di validità, ecc.

Lo scopo di questo lavoro è quello di testare la possibilità di creare un sistema per la previsione del rischio idraulico per un bacino di scala regionale. La scelta di un bacino di queste dimensioni consente di ottenere un quadro complessivo abbastanza realistico delle difficoltà e dei problemi di realizzazione. Durante il lavoro si è infatti tenuto presente che le risorse economiche e umane necessarie alla costruzione del sistema non dovevano superare quelle che, presumibilmente, possono essere messe in moto durante la stesura di un piano di bacino di rilievo regionale; inoltre si è ritenuto fondamentale ottenere un prodotto, oltre che affidabile, anche di semplice gestione.

In quest'ottica si è scelto di realizzare un sistema semplificato che prevede per la raccolta dati di fare affidamento su quelli già disponibili attraverso i normali canali quali enti pubblici, consorzi, centri di ricerca, senza prevedere l'uso di dati difficilmente reperibili o la costruzione di nuove reti o campagne di rilevamento.

Nonostante questa limitazione di obiettivi si è comunque cercata una implementazione di un



sistema "aperto", cioè in grado di accogliere in futuro modelli più complessi e dati in misura più articolata. In questa ottica nel capitolo 1 si sono discussi una grande varietà di ambiti modellistici. La flessibilità nella strutturazione dei dati ha portato allo sviluppo di una collezione di librerie in linguaggio C, chiamate FuidTurtle, ha cui l'autore della presente tesi ha collaborato.

Alla fine, nel presente lavoro si sono implementati due modelli, uno per la trasformazione afflussi deflussi e l'altro di propagazione dell'onda di piena. Entrambe i modelli sono stati realizzati cercando di ottenere un prodotto di validità generale ma calibrato sulle necessità del bacino; per esempio nella generazione dei deflussi non si tiene conto dello scioglimento nivale (del tutto irrilevante per la zona in esame: ma il codice risulta facilmente aggiornabile anche in questa direzione). Come è già stato sottolineato le varie componenti di sistemi di questo tipo possono essere integrate con molta efficacia attraverso l'utilizzo di un G.I.S: per questo lavoro è stato utilizzato Microstation Geographics. La scelta è stata dettata dalla necessità di operare con uno strumento completo ma leggero (sia in termini di costi che di risorse hardware), che consentisse di lavorare con banche dati esterne e che fosse derivabile o integrabile con sistemi molto più costosi (in questo caso Intergraph).

Con il G.I.S. sono stati organizzati tutti i dati raccolti per ottenere il "quadro conoscitivo" che, con una buona gestione del sistema, può trasformarsi da una semplice "foto" dello stato attuale ad un "filmato" della evoluzione del bacino. Il G.I.S. e i modelli idrologici sono stati collegati utilizzando la conversione dei dati: l'input è stato trasformato dal formato G.I.S. a un formato valido per i modelli e l'output dei modelli è stato convertito in formato G.I.S.

La tesi pertanto si compone di un primo capitolo cui si è già accennato nel quale si sono esaminati gli elementi fondamentali che compongono il sistema di previsione del rischio idraulico: acquisizione dei dati, modelli idrologici e interfacciamento con Sistemi Informativi Geografici. Un secondo capitolo nel quale sono illustrati i modelli utilizzati: un semplice modulo geomorfologico e uno per la propagazione dell'onda di piena attraverso l'integrazione delle equazioni di de Saint Venant; infine nel terzo capitolo sono presentati i risultati della applicazione al bacino del Torrente Nervia, nell'estremo ponente ligure.



CAPITOLO 1 CONTROLLO IN TEMPO REALE DEI SISTEMI IDROLOGICI

1.1 Introduzione

Quando si illustra un nuovo sistema di previsione e controllo in tempo reale dei sistemi idrologici è relativamente semplice spiegare che non si tratta semplicemente di un'altra tecnica idrologica, ma di un servizio, di un'attività economica che, per sortire risultati corretti, richiede anche lo sviluppo di tecnologie non idrologiche come le telecomunicazioni, il telerilevamento, le applicazioni informatiche e l'uso di computer, ecc.. e il contributo d'esperti con diverse specializzazioni.

Risulta meno facile spiegare perché non sia possibile individuare una procedura univoca che possa condurre dalla progettazione del sistema al conseguimento degli obiettivi, che molto spesso sono essi stessi diversificati (inoltre non è sempre chiaro quale sia il risultato più importante da raggiungere).

La molteplicità dei percorsi che possono condurre al conseguimento dell'obiettivo è spesso ridotta dagli "specialisti" selezionando i migliori modelli di previsione disponibili. Purtroppo non esiste il modello "migliore", ogni modello comporta vantaggi diversi al variare delle situazioni, non bisogna inoltre dimenticare che i modelli non sono l'unica componente del sistema ma devono essere integrati in una struttura complessa.

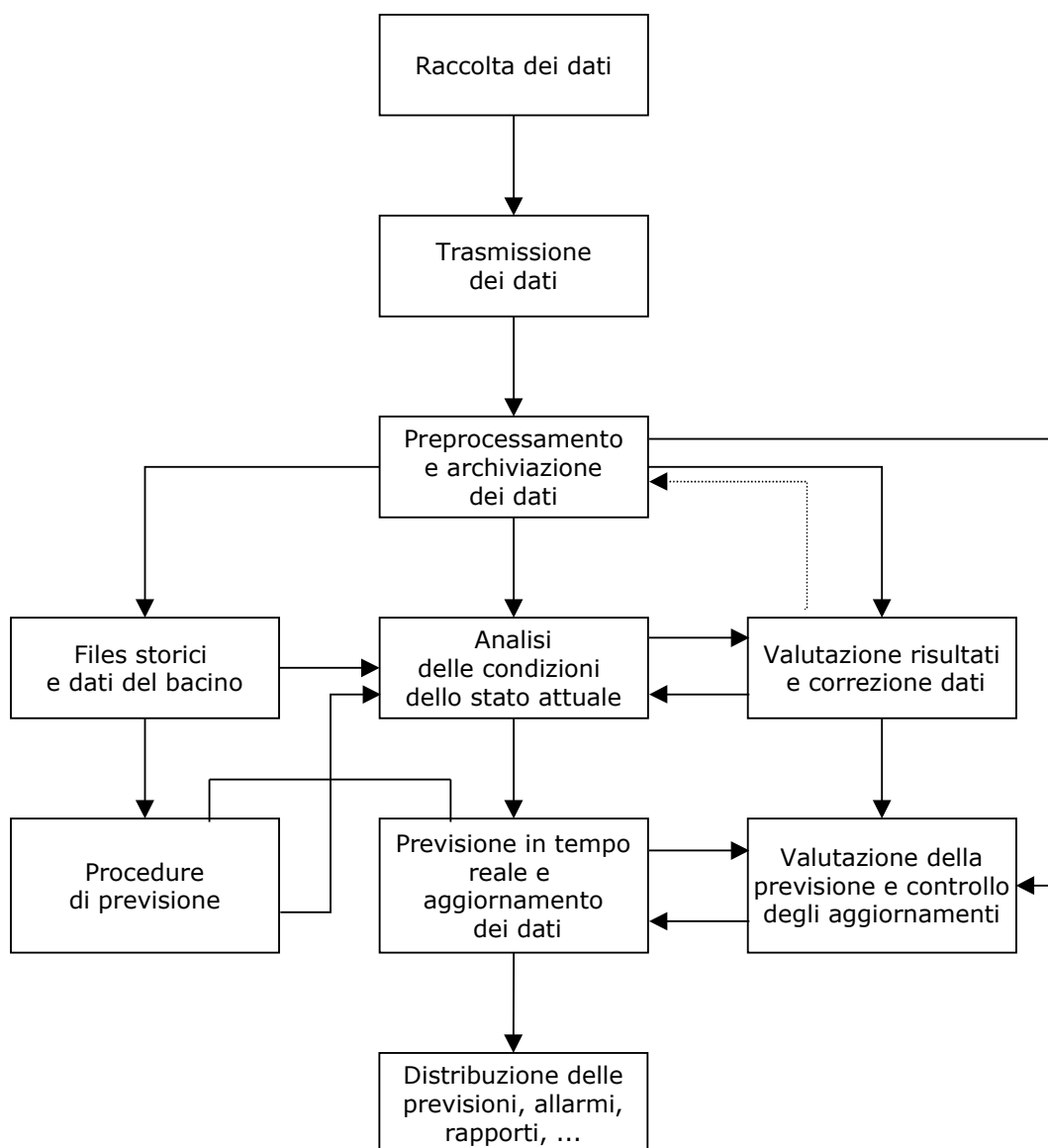


Figura 1.1 Schema di un possibile sistema per il controllo idrologico del territorio [NEMEC, 1992]



Dallo schema di Figura 1.1 risulta evidente che le componenti fondamentali del sistema sono da una parte, la raccolta, l'analisi e l'archiviazione dei dati e dall'altra, l'utilizzo dei modelli idrologici. Il progettista del sistema di controllo e previsione può non essere esperto in entrambe i settori; perciò spesso, nonostante tutti preferiscano che le due fasi siano tecnicamente compatibili e correttamente interfacciate, si è tentati di considerarle separatamente. Il primo errore in cui il progettista incorre è quello di sottovalutare l'importanza del sottosistema di acquisizione e archiviazione dei dati rispetto alla scelta o alla realizzazione dei modelli idrologici, invece esso deve essere considerato un tutt'uno con la modellazione e può risultare cruciale per l'accuratezza e l'efficacia dell'intero sistema di previsione e controllo.

I Sistemi informativi Geografici (G.I.S.) rappresentano, in questa prospettiva, l'ambiente ideale all'interno del quale i dati del territorio, raccolti dai diversi utenti e dai diversi settori coordinati al progetto, possono essere archiviati e relazionati. Ciò avviene tramite l'utilizzo di database relazionali e di altre tecniche proprie dei GIS quali la sovrapposizione tematica dei dati e l'utilizzo degli attributi legati agli elementi geografici per analisi statistiche o per modelli matematici.

Talvolta tuttavia il fascino dello strumento informativo maschera una incredibile sovrasemplificazione dei modelli sottostanti, nel seguito verranno elencati, in breve e criticamente, le problematiche salienti delle parti schematizzate.

1.2 Raccolta dei dati.

I processi idrologici sono fortemente variabili nello spazio e nel tempo, e questa variabilità esiste a tutte le scale, dai centimetri alla scala continentale, dai minuti agli anni. La raccolta dei dati su un così ampio range di scale è difficile e costosa.

Non bisogna dimenticare che nella storia dell'idrologia, così come nelle altre scienze, la maggior parte dei contributi più significativi ha fatto seguito a nuove misure ed a una stretta collaborazione fra modellisti e sperimentatori. Al contrario oggi si assiste ad una netta divisione fra coloro che si occupano di raccolta dei dati e gli analisti.

La raccolta dei dati e lo sviluppo dei modelli non sono processi indipendenti, idealmente ognuno dovrebbe contemporaneamente recepire e suggerire indicazioni, si può affermare infatti che i migliori modelli chiariscono il tipo e la qualità dei dati necessari per testare le ipotesi fatte e che i dati e le misure più significative permettono a loro volta lo sviluppo di modelli migliori e più completi e la formulazione di nuove ipotesi.

La comprensione di questa sinergia è fondamentale.

Infatti i recenti sviluppi nei modelli spaziali e temporali e le nuove tecnologie di acquisizione dati richiedono un ripensamento di molti dei tradizionali problemi idrologici e rendono questa impostazione imprescindibile.

Di seguito verranno brevemente esposte le principali problematiche inerenti la raccolta dati di topografia, precipitazione, portate, evapotraspirazione ed uso del suolo. Tali problematiche verranno descritte singolarmente per categoria e alla fine ne verrà discussa la loro integrazione

1.2.1 TOPOGRAFIA

L'esame dei processi idrologici richiede, oltre alle informazioni sul sottosuolo, anche informazioni sulla superficie della terra; tra queste forse le più importanti sono le informazioni sulla topografia.

L'elevazione e i relativi parametri (pendenza, esposizione e aree drenanti) esercitano una influenza fondamentale sull'idrologia superficiale e profonda e in definitiva sull'intero ecosistema. La topografia influenza la radiazione intercettata, la precipitazione, le portate e i flussi di sedimento, l'evaporazione, l'umidità e le caratteristiche della vegetazione.

I dati topografici digitali permettono calcoli automatici della strutture degli spartiacque e della rete superficiale; queste misurazioni devono essere di alta qualità per impedire che la propagazione degli errori, legata alle derivate del primo e del secondo ordine dell'elevazione, renda inattendibili i risultati dei calcoli.

Anche nei paesi industrializzati molti dei dati topografici esistenti sono inadeguati. È inoltre necessario che questi siano disponibili in forma digitalizzata, essendo spesso necessario trattare una grande quantità di dati.



L'alta risoluzione digitale topografica (circa 10 m di risoluzione orizzontale e 1 metro di risoluzione verticale) esiste solo per gli Stati Uniti, l'Australia e l'Europa occidentale.

Anche questi dati ad alta risoluzione possono non essere sufficienti per alcuni tipi di indagini come la determinazione delle fasce di pertinenza e il monitoraggio dei bacini a fini di protezione civile. In questi casi è consigliabile ricorrere a una risoluzione maggiore ottenibile per mezzo di rilievo aerofotogrammetrico.

1.2.2 P R E C I P I T A Z I O N I

Le precipitazioni sono generalmente misurate in tutto il mondo ma il raggiungimento di una solida conoscenza della loro distribuzione spaziale e temporale è ostacolato sia dalla diversità degli standard di osservazione che dalla errata distribuzione delle reti di osservazione.

In particolare per alcune località sono disponibili serie storiche di qualche centinaio di anni, mentre per il resto del territorio italiano è difficile ottenere serie complete per più di cinquanta anni.

Nella maggior parte dei casi le serie di interesse sono registrate su carta e nessuno ha provveduto alla loro trascrizione informatica e ovviamente, dato lo stato delle cose, alla loro validazione.

Come molti altri parametri idrologici la piovosità è estremamente variabile nel tempo e nello spazio.

Le misure di cui normalmente si dispone sono quelle dei misuratori a terra ottenute attraverso un pluviografo. Questo comporta la necessità di interpolare i dati per mezzo di strumenti geostatistici il cui utilizzo, nel caso di una scelta non accurata dei luoghi di misura, può rivelarsi problematico.

Inoltre i dati su scale temporali più brevi di un mese sono difficili da ottenere, sebbene per molti studi e applicazioni siano necessarie registrazioni giornaliere o anche orarie. Non va inoltre dimenticato che le misure sono fortemente influenzate anche dalle caratteristiche, dalla disposizione e dalla esposizione dello strumento.

Per ovviare a questi inconvenienti si stanno sviluppando dei metodi satellitari o radar per la



stima delle precipitazioni. Queste tecniche, assai promettenti, permettono per ora una discreta stima della distribuzione areale della pioggia, ma non ne permettono ancora la stima della quantità.

Lo stato dell'arte è rappresentato da metodi che riescano a combinare in modo ottimale le misure effettuate da satellite, da radar e quelle ottenute a terra con la teoria statistica per produrre campi di pioggia a larga scala e per creare migliori archivi di dati rispetto a quelli esistenti.

Gli accumuli nevosi, con cadenza stagionale, si sciolgono per produrre acqua che alimenta lo scorrimento superficiale o che ricarica le falde sotterranee.

I dati sul manto nevoso sono raccolti da una varietà di organizzazioni con scopi diversi e con pochi scambi di informazioni.

In passato le misure erano fatte in punti prefissati, con le tecniche del telerilevamento, una volta superate le difficoltà relative all'interpretazione dei segnali di ondacorta, saranno disponibili misure su larga scala.

Per quanto riguarda il bilancio energetico della fusione del manto nevoso i dati relativi sono raccolti da poche stazioni, e si tratta spesso di stazioni di misura sperimentali che operano per brevi periodi. Le informazioni circa proprietà fondamentali come l'albedo sono raramente disponibili, e le misure necessarie per lo sviluppo di modelli di previsione delle portate sono disponibili solo localmente.

Recenti studi sulla atmosfera e sulla chimica del manto nevoso hanno stimolato la raccolta di dati ma non sono disponibili serie di dati consistenti a livello regionale.

1.2.3 P O R T A T A

Le misurazioni di portata sono normalmente eseguite in tutto il mondo, tuttavia la distribuzione spaziale e temporale di questi dati è irregolare e fortemente legata al locale livello di sviluppo.

Nel nostro paese, fatta eccezione per i fiumi principali le misure di portata sono irregolari sia nello spazio che nel tempo, e l'accuratezza delle misure non è omogenea essendo



generalmente inferiore per i fiumi o torrenti di minore portata. Come è noto la misura delle portate richiede generalmente la conoscenza accurata della sezione e questa non è mai normalmente controllata nel corso del tempo.

1.2.4 U M I D I T À D E L S U O L O

Il serbatoio temporaneo dell'acqua, al di sotto della superficie del terreno nella zona delle acque vadoze, coincide generalmente, nelle zone pianeggianti o vallive, con lo strato di radicamento delle piante. Questo strato dovrebbe essere misurato in campo, in alcuni punti, ed esteso al territorio intero per mezzo di mappe delle colture.

Il contenuto d'acqua del suolo può essere calcolato con misure satellitari (soggette per ora ad errori sensibili) e validato attraverso l'uso di modelli di bilancio idrologico.

Nei versanti lo strato di suolo atto ad immagazzinare l'acqua è generalmente sottile (da 0 a 2 metri), e la sua conoscenza è essenziale per valutare il processo di formazione del deflusso. Questo può essere fatto attraverso l'analisi dei dati digitali del terreno accoppiati ad alcune misure di campo.

Dal suolo l'umidità può ritornare all'atmosfera oppure può essere temporaneamente immagazzinata dalla vegetazione o percolare nella zona satura.

Come è facile intuire le informazioni circa l'umidità del suolo e la sua distribuzione spaziale sarebbero di grande valore per definire la natura dinamica dei processi idrologici. Eccetto che nei bacini oggetto di particolari indagini sperimentali l'umidità del suolo non è mai misurata e i dati sulla sua variazione spaziale sono estremamente scarsi. Il contenuto d'acqua nel suolo può essere studiato con l'uso di modelli di bilancio idrologico, Verardo [1998].

1.2.5 A C Q U E S O T T E R R A N E E A L D I S O T T O D E L L A Z O N A

V A D O S A

La variabile fondamentale misurata nel rilevamento delle acque sotterranee è il livello nei pozzi.

Se sono disponibili informazioni sulle proprietà dell'acquifero è possibile con queste misure stimare i flussi di acqua sotterranea. Le stime possono procedere a diversi livelli di sofisticazione variando dalla semplice applicazione della legge di Darcy ai bilanci di flusso fino all'uso di modelli numerici dell'acquifero.

La conoscenza delle proprietà geologiche del mezzo è indispensabile per il calcolo dei flussi e del volume del serbatoio, infatti la qualità dei calcoli è direttamente correlata alla qualità e alla numerosità delle misure di tipo geologico.

Le quantità di acqua di ricarica e di deflusso della falda sono raramente monitorate, fatta eccezione per le sorgenti utilizzate per uso potabile.

Le serie storiche di dati, sebbene in alcuni casi risalgano a più di cento anni, sono generalmente disponibili a partire dagli anni cinquanta. Come già accennato la numerosità dei dati cala drasticamente per gli acquiferi profondi e per quelli privi di potenziale interesse quale risorsa idrica.

1.2.6 E V A P O T R A S P I R A Z I O N E

A dispetto della sua importanza fondamentale nel ciclo idrologico non esistono misure di routine dell'evapotraspirazione. Infatti, nonostante siano già state sviluppate le tecnologie necessarie e siano disponibili gli strumenti, sono ancora richieste speciali competenze per operare, pertanto una rete di stazioni di misura per un rilievo esteso e a lungo termine sarebbe



troppo costosa.

Come detto una base di dati solida in materia di evapotraspirazione è mancante, esistono invece mappe che descrivono l'evapotraspirazione media approssimata a lungo termine. Sempre a grande scala, una previsione dell'evapotraspirazione appare possibile correlando la radiazione infrarossa emessa dalle chiome delle piante e i modelli di circolazione atmosferica attualmente disponibili.

La gran parte dei lavori su larga scala, esperimenti sul campo come HAPEX, FIFE e GEWEX, affrontano invece la questione della misura dell'evapotraspirazione a livello di bacino idrologico.

1.3 *Modelli idrologici*

1.3.1 MODELLI DI PIOGGIA

Dei modelli utilizzati in passato non si potevano individuare punti deboli, in quanto tutta la catena di conoscenze risultava insufficiente. In primis la conoscenza dei fenomeni: non si avevano strumenti adeguati per descrivere la distribuzione e l'intensità delle piogge, non si avevano conoscenze strutturate sui meccanismi di formazione del deflusso e, benché le leggi di propagazione delle onde di piena fossero note, non si era in grado di integrare questa conoscenza con condizioni iniziali e al contorno sufficientemente credibili.

Ora la situazione è mutata: l'uso di tecniche geostatistiche [si veda ad esempio De Marsily 1986] ha consentito se non la previsione delle piogge una loro ragionevole interpretazione. Tecniche frattali di analisi hanno posto le basi per l'interpretazione di correlogrammi anomali [Foufula-Georgiu 1994] e l'abbandono di schemi di integrazione di acque basse ha dato spinta a modelli di trasporto convettivo che potranno presumibilmente portare a modelli di area



limitata (LAM) in grado di produrre previsioni attendibili della quantità di pioggia [Emanuel, 1994]

1.3.2 LA GENERAZIONE DEL DEFLUSSO

I primi schemi di generazione ipotizzavano [Horton, 1933] che il deflusso superficiale avvenisse quando l'intensità di precipitazione eccedeva la capacità di infiltrazione del terreno e che quest'ultima diminuisse esponenzialmente durante l'evento. Successive indagini in situ [e.g. Dunne e Black, 1970a,b] hanno evidenziato come in climi umidi e in presenza di coperture vegetali queste dinamiche di eccesso di saturazione si verificano solo in porzioni limitate del bacino [Freeze, 1974], mentre gran parte del volume di pioggia si infiltra nel terreno. Nello stesso tempo è stato notato [e.g. Kirkby, 1978; Heimsath et al., 1997] che, nell'area di generazione del deflusso di un sistema idrografico (parte montana di un corso d'acqua), i versanti presentano generalmente un suolo non molto spesso (0.1-1 m, valori maggiori sono osservati nei fondovalle), delimitato inferiormente da un letto roccioso a bassa permeabilità. Il terreno superficiale, per via di fenomeni di alterazione meccanica e chimica, risulta avere una maggiore permeabilità che diminuisce con la profondità a causa dei processi di compattazione [Beven, 1984]. Le stratificazioni del terreno, inoltre, inducono un'anisotropia nel tensore di conduttività idraulica con una maggiore permeabilità nella direzione parallela al pendio. Il deflusso subsuperficiale [Freeze, 1972a,b] risulta pertanto essere di gran lunga più abbondante di quello profondo e consente un meccanismo di saturazione del versante a partire da valle, in prossimità delle aste fluviali, oltre che nelle aree concave, per via della convergenza dei percorsi di drenaggio. Questa interpretazione [Dunne, 1978] delle dinamiche idrologiche che intervengono nelle parti esterne alla rete idraulica spiega, attraverso l'ipotesi di una graduale saturazione del versante da valle verso monte, la variabilità delle aree sorgenti [Hewlett, 1974] nel corso di una piena. Lo studio dei processi di generazione del deflusso richiederebbe pertanto l'integrazione durante l'evento delle leggi del moto subsuperficiale in ogni versante e l'individuazione delle aree sature (sorgenti).

Una possibile impostazione consiste nell'integrazione, con condizioni verosimili al contorno, delle equazioni di continuità e del moto nell'ipotesi in cui questo sia laminare (legge di Darcy).



Lo stato di parziale saturazione del terreno dovuto alle tensioni capillari condiziona tuttavia i processi subsuperficiali e richiede uno studio più generale attraverso le equazioni di Richards [1931] introducendo forti non linearità nel problema. Le grandi incertezze con le quali viene generalmente stimata la permeabilità satura del terreno e individuata una dipendenza di quella non satura dallo stato di umidità del suolo, tuttavia, non consentono di giustificare un'impostazione così dettagliata e dispendiosa. A questo si aggiunga il dubbio che le equazioni di Richards siano dinamicamente adeguate per lo studio dei fenomeni di versante; è stato infatti osservato come la presenza di macropori (fessurazioni, tane di animali, vie preferenziali di filtrazione aperte dalle radici delle piante) nei terreni naturali [Montgomery e Dietrich, 1995] non consenta [Kirkby, 1988] l'ipotesi moto laminare e imponga un diverso studio del problema [Philip, 1989]. La risoluzione (analitica o numerica) delle equazioni dinamiche dei moti subsuperficiali costituisce comunque un interessante metodo per lo studio dell'idrologia di versante [e.g. Philip, 1969, 1991; Costa-Cabral et al., 1992] ma si ritiene che, nella simulazione della risposta di un bacino, questi processi debbano essere modellati schematicamente attraverso una sintetica descrizione dei meccanismi principali.

Il ruolo della struttura spaziale del reticolo idrografico nel veicolare la piena è stato chiarito da Rodriguez-Iturbe e Valdes [1979] e Rinaldo et al. [1992]

Non tutti gli aspetti concettuali sono stati chiariti ma il quadro consente di affermare che l'uso di modelli semplificati ed eccessivamente schematici del passato sarà via via sempre più limitato e circoscritto in favore di modelli di più chiara interpretazione fisica.

Allo stesso modo le conoscenze acquisite consentono il superamento di modelli distribuiti come lo SHE (Systeme Hydrologique Europeen) in cui venivano modellati il deflusso dei versanti con le equazioni di Richards e il deflusso nei canali integrando le equazioni di de Saint Venant. In tali modelli infatti risultava di difficile soluzione il problema della identificazione dei parametri delle equazioni attraverso la misura (la permeabilità idraulica dei versanti, la massima capacità di immagazzinamento di acqua nello strato di suolo, la geometria delle sezioni nei corsi d'acqua, la scabrezza degli alvei). In molti casi inoltre tali modelli facevano riferimento a situazioni ideali di laboratorio non riscontrabili nelle situazioni di campo.



1.3.3 M O D E L L I D I S C I O G L I M E N T O N I V A L E

In alcuni bacini il ruolo dello scioglimento nivale è importante. Il ruolo della neve consiste nel ritardare il rilascio delle precipitazioni nel corso di alcuni mesi. Lo scioglimento può essere tuttavia relativamente concentrato nel tempo di alcuni giorni in concomitanza di innalzamento di temperatura e pioggia. Un moderno modello di scioglimento della neve è per esempio quello prodotto dall'Università dello Utah (<http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/oltarb/>), basato sul bilancio dell'energia radiante. Il modello usa una rappresentazione aggregata dello strato di neve ed è basato su due variabili primarie, la massa equivalente in acqua della neve ed il suo contenuto energetico.

1.3.4 M O D E L L I A F F L U S S I D E F L U S S I

L'approccio moderno ai modelli di afflussi deflussi è quello di usare modelli distribuiti nelle informazioni topografiche, come deducibili da modelli digitali del terreno e solitamente concentrati nei parametri dinamici, ovvero dipendenti da pochi parametri chiave, quali una celerità e un coefficiente di dispersione nelle parti canalizzate (ma non conosciute nel dettaglio delle sezioni e del sedimento), un tempo di residenza per unità di lunghezza nei versanti e un ulteriore coefficiente di dispersione, un coefficiente di deflusso calcolato in base al volume d'acqua presente istantaneamente nel bacino.

Questi parametri sono in genere sufficienti a riprodurre le onde di piena in bacini di media dimensione, in cui la natura delle eterogeneità fisiche e dinamiche sia tale da garantire la sufficienza di un trattamento statistico. La scala alla quale questo è possibile, chiamata REA (Elementary Representative Area), è una grandezza variabile, dipendente da clima, geologia, litologia, e vegetazione del bacino fluviale, ma è generalmente valutabile attorno ai 5 km². A scale più piccole la variabilità dei singoli bacini è dominante. Alle scale grandi, a partire dai 100 km² non si possono ottenere piene fluviali senza una corretta descrizione spaziale delle piogge. Questo suggerisce dunque che un bacino fluviale possa essere pensato come l'unione di unità idrologiche delle dimensioni succitate che possono diventare di maggiore grandezza se le eterogeneità del bacino e gli scopi del modello lo consentono.



Un'altra classe di modelli idrologici è fornita dai modelli di interpolazione di serie temporali. Tra questi sono da ricordare i modelli autoregressivi e a media mobile (AR e MA) [Moisello, 1998] e più recentemente modelli non lineari basati su tecniche sviluppate per l'analisi di moti caotici ma non necessariamente a questi limitati [Ridolfi, 1998]

1.4 I G.I.S.

I Sistemi Geografici Informativi (Geographics Information Systems) rappresentano lo strumento ideale per la raccolta e il coordinamento di tutta la vasta gamma di informazioni necessarie alla caratterizzazione di un bacino idrografico e contemporaneamente consentono l'utilizzo di queste informazioni all'interno di modelli idrologici. Il loro uso incide sia sulla modalità di acquisizione dei dati che sulla strutturazione dei modelli. Vi sono quindi dei GIS che meglio si prestano all'analisi idrologica ed idraulica di altri.

Cercheremo qui di seguito di capire come e perché.

1.4.1 ARCHIVIAZIONI DEI DATI

La prima grande potenzialità del GIS risiede nella capacità di rappresentare spazialmente le informazioni raccolte.

Non si tratta di una semplice rappresentazione geometrica degli oggetti, infatti il GIS mantiene e gestisce le mutue relazioni spaziali fra i diversi elementi quali l'adiacenza, la connessione e l'inclusione, ovvero la topologia. Oltre all'aspetto geometrico e topologico sono fondamentali gli "attributi" che descrivono le caratteristiche dei singoli oggetti geometrici.

I dati spaziali, sia vettoriali che raster (definiti di seguito), definiscono la posizione spaziale dell'oggetto geografico nel sistema di riferimento scelto.



I dati spaziali vettoriali, essenzialmente punti, linee e poligoni, descrivono schematicamente gli oggetti geografici reali in un sistema di coordinate x,y . Diversamente i dati spaziali raster rappresentano gli oggetti geografici come immagini, ossia matrici di pixel. Nel GIS dati vettoriali e raster coesistono e si integrano a vicenda e sono generalmente usati, i primi per dati discreti e i secondi per dati continui (ad esempio rete viaria vettoriale e umidità del suolo derivata da immagini da satellite raster.)

Questi dati spaziali, di per sé rappresentabili anche in un sistema CAD, sono, all'interno del GIS, legati da mutue relazioni topologiche necessarie anche per collegare tali elementi alle relative descrizioni o attributi.

I dati descrittivi, rappresentano l'elemento più importante di un modello dati GIS.

L'utente di un GIS non ha solo bisogno di restituire una carta, ad esempio la litologia superficiale, quanto di rappresentare un tematismo, ad esempio retinarla in funzione dell'uso del suolo.

Questo si ottiene interrogando banche dati di vario tipo, per esempio relazionali; gli attributi, che possono risiedere anche su più sistemi ed essere aggiornati da diversi applicativi, sono memorizzati in database.

Una struttura del database, accuratamente progettata, permette di effettuare numerose analisi sui dati, garantisce la massima flessibilità per eventuali cambiamenti nella struttura degli archivi e una grande maneggevolezza nel gestire una elevatissima quantità di informazioni.

1.4.2 GIS E MODELLI IDROLOGICI

Il GIS era utilizzato per gestire e analizzare dati spaziali di qualsiasi tipo, dalla pianificazione urbana all'asestamento forestale. A quell'epoca gli idrologi raccoglievano gli stessi dati e li archiviavano in formati specifici per i propri modelli.

Le analisi del GIS non erano rispondenti ai bisogni degli idrologi, d'altro canto i modelli non erano efficaci per gestire e visualizzare i dati.

L'integrazione delle tecnologie incominciò lentamente con il GIS utilizzato per le sovrapposizioni tematiche e l'aggregazione delle informazioni che venivano poi passate a programmi esterni



Fortran o a software statistici. Questo tipo di implementazione richiedeva modelli semplici e complesse routine di input ed output.

L'integrazione di GIS e modelli idrologici si è andata via via sviluppando ma sempre in maniera "GIS centrica". Questo è avvenuto principalmente a causa del fatto che i GIS hanno dimostrato di poter effettuare agevolmente alcuni dei processi che prima erano demandati a routine specifiche dei modelli: gestione dei dati, validazione e visualizzazione.

Ci sono, in generale, tre approcci per integrare GIS e modelli idrologici: il primo basato sulle funzionalità del GIS, il secondo sulla conversione dei dati e l'ultimo sulla completa integrazione. Per scegliere quale di questi sia il più appropriato per una particolare applicazione bisogna considerare molti aspetti. Mentre i metodi sono in costante evoluzione gli approcci "generali" e i problemi che si devono essere presi in considerazione rimangono sempre validi.

1. modellazione basata sul GIS

Con questo approccio la realizzazione dei modelli avviene utilizzando gli strumenti disponibili nel G.I.S. La modellazione attraverso il G.I.S è particolarmente efficace per modelli concettualmente e matematicamente semplici, che non richiedono l'intervento di programmatori molto esperti, si è inoltre dimostrato efficace nei casi in cui si utilizza una base di dati molto ampia.

Si tratta dell'approccio più semplice poiché richiede la conoscenza di un solo software. Attualmente i G.I.S. stanno evolvendo includendo sempre nuovi applicativi specifici per l'idrologia rendendo questo tipo di approccio sempre più diffuso.

2. conversione dei dati

L'approccio di gran lunga più utilizzato per legare G.I.S. e modelli idrologici è senza dubbio la conversione dei dati. Molte energie sono state impiegate per scrivere programmi in grado di trasferire i dati spaziali dal G.I.S. al modello e per convertire i risultati per la visualizzazione e le successive analisi con il G.I.S.

3. codice inglobato

Il metodo più solido di integrazione è allo stesso tempo quello che richiede il maggior impiego di risorse di programmazione è quello di integrare il codice di un programma all'interno dell'altro. Comunemente ciò si ottiene integrando le routine di input e output del G.I.S. all'interno del modello, in questo modo il modello è in grado di leggere e scrivere i dati nel formato originario del G.I.S. La mancanza di passi di conversione

intermedi consente di ottenere delle applicazioni la cui velocità permette lo sviluppo di applicazioni interattive che non sono possibili con gli altri sistemi.

1.4.3 GIS E PROBLEMI DI SCALA

Come precedentemente sottolineato le scale temporali e spaziali dei processi idrologici sono molto ampie. Per quanto concerne la risoluzione spaziale il GIS non pone limitazioni, poiché la maggior parte dei GIS disponibili supportano risoluzioni spaziali molto alte. La risoluzione temporale costituisce invece un elemento critico per il successo dell'applicazione dei modelli idrologici ai GIS. I processi idrologici possono essere divisi a seconda della velocità di cambiamento come mostrato in Figura 1.2.

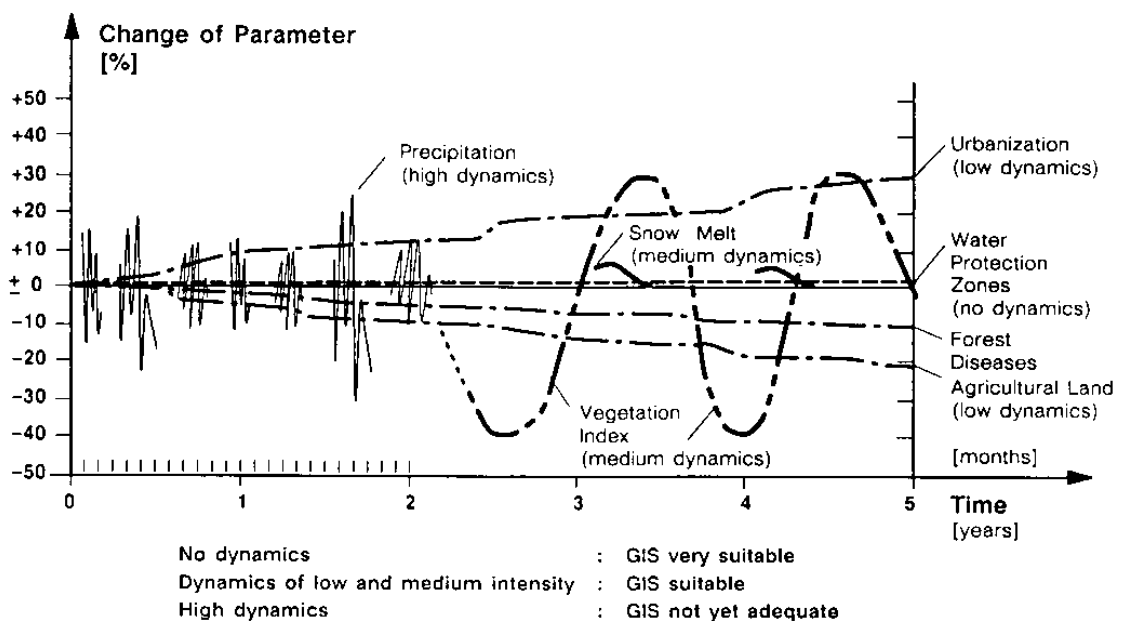


Figura 1.2 L'applicabilità dei GIS al variare della dinamicità dei sistemi idrologici [Schultz, 1996]



Il rapporto tra i software GIS e i sistemi idrologici, dal punto di vista della dinamica si può riassumere osservando che: se un sistema idrologico può essere considerato invariante nel tempo, ovvero mostra cambiamenti apprezzabili su scale temporali dell'ordine dei 5-10 anni, i GIS esistenti possono essere usati senza problemi. Lo stesso si può dire per sistemi che manifestano cambiamenti lenti (tipo urbanizzazione, uso del suolo agricolo e forestale) dove le caratteristiche dei sistemi possono essere utilizzate per l'identificazione dei parametri dei modelli e devono essere aggiornate con cadenze pluriennali anni. Anche per sistemi idrologici caratterizzati da processi con cambiamenti stagionali (lo stato della vegetazione, il ricoprimento e lo scioglimento nivale) possono essere usati GIS convenzionali e le informazioni solitamente necessitano di aggiornamenti settimanali o mensili. L'utilizzo dei GIS con modelli che simulano processi idrologici fortemente variabili è più complicato soprattutto se l'acquisizione dei dati deve essere fatta in tempo reale e si devono ottenere nuove simulazioni minuto per minuto. In questo caso non è più possibile ricorrere alle applicazioni fornite nei GIS tradizionali e anche l'interfacciamento GIS-modelli idrologici attraverso lo scambio dei dati risulta troppo lento e macchinoso. Si deve mirare alla completa integrazione dei due strumenti inglobando il codice dei modelli nel GIS o viceversa.



CAPITOLO 2 **MODELLI IMPLEMENTATI**

In questo capitolo sono presentati i modelli usati nella presente tesi per produrre e propagare l'onda di piena. In particolare di questi vengono descritti accuratamente gli aspetti peculiari alla seguente implementazione.

Il modello si compone di un semplice modulo geomorfologico e di una parte di propagazione. La separazione delle piogge efficaci è stata qui realizzata con il modello SCS. Il modulo di propagazione implementato è unidimensionale ma la struttura del programma è predisposta ad accogliere dei moduli di espansione, come per esempio un modulo di propagazione tridimensionale la cui possibile implementazione è discussa brevemente nel paragrafo 2.2.6



2.1 **Modello Geomorfologico**

2.1.1 CHE COS'È UNA PIENA

Una piena si manifesta in una sezione di un corso d'acqua con un aumento dell'altezza idrometrica, un aumento di portata e un corrispondente aumento della velocità media.

Si può riconoscere una fase di crescita, un colmo (picco o stanca), ed una fase di decrescenza. La presenza di uno o più picchi dipende dalla struttura morfologica del bacino in cui la piena è generata e dalla distribuzione spaziale e temporale della pioggia che la genera.

I valori importanti in una sua descrizione sono:

- ◆ la portata massima generata dalla piena, Q_{max} ;
- ◆ il coefficiente di deflusso, $\phi = \frac{\int J(t) dt}{\int Q(t) dt}$, definito come il rapporto tra il volume di pioggia e il volume defluito alla sezione di controllo;
- ◆ il coefficiente udometrico, definito come la portata massima per unità di superficie che ci si può aspettare in un determinato bacino di area A , $u=Q_{max}^*/A$;
- ◆ la durata, T ;
- ◆ il tempo al picco, t^* , ovvero il tempo in cui, a partire dall'inizio dell'evento si produce il picco di piena;
- ◆ il tempo medio di residenza, $\langle T \rangle = 1/T \int_0^T Q(t) dt$
- ◆ la dispersione, $\sigma(T) = 1/T \left(\int_0^T (Q(t) - \langle T \rangle)^2 dt \right)^{1/2}$



Queste ultime due grandezze fanno riferimento alla descrizione della piena per tempi di residenza descritta ampiamente in seguito.

Il tempo di corrivazione, T^* , è definito come il tempo nel quale tutto il bacino contribuisce alla formazione della piena. Un punto posto ad una certa distanza dalla sezione di controllo non può contribuire istantaneamente alla piena, ma con un ritardo idraulico, dovuto al tempo necessario alla pioggia ivi caduta a raggiungere i canali e quindi, lungo i canali, l'uscita.

2.1.2 C O M E S I F O R M A U N A P I E N A

La comprensione del processo di formazione del deflusso efficace comprende la descrizione della distribuzione delle precipitazioni al suolo, i processi di infiltrazione e i processi di trasporto dell'acqua nei versanti.

Si assuma per semplicità di poter ridurre la nostra osservazione ad un bacino in cui la precipitazione si possa considerare spazialmente costante (ciò implica anche la scelta di una scala temporale di osservazione del fenomeno di piena sufficientemente aggregata). Si trascura anche il dettaglio spaziale degli effetti di intercettazione della precipitazione delle piante, che si supporranno descritti da un coefficiente di riduzione medio, per concentrare l'attenzione sui processi di infiltrazione e di deflusso nei versanti.

In linea di principio, il processo di infiltrazione - deflusso sembrerebbe teoricamente ben compreso e descritto dalle equazioni di Richards, o, con maggiore approssimazione dal modello di Green-Ampt. A questa completa e ideale comprensione, si contrappongono alcuni fatti: la topografia dei versanti può essere conosciuta con grande approssimazione, ma non la struttura tridimensionale dei suoli in cui il deflusso efficace si genera; la conduttività idraulica dei versanti, non solo dipende dal contenuto d'acqua già presente nel suolo, ma varia anche da punto a punto in modo da potersi ritenere una variabile aleatoria e non una costante. Quest'ultimo fatto altera completamente la natura delle equazioni e le rende più difficili da risolvere. La conduttività idraulica diminuisce anche con la profondità in dipendenza dei fenomeni geochimici e biologici, che formano e modificano il suolo secondo una legge di tipo esponenziale.



Un'idea qualitativa delle velocità dell'acqua nei suoi vari passaggi è riportata in Tabella 2.1.

Tipo	Scala temporale	Velocità [cm/s]
Deflusso profondo	giorni-anni	$\leq 10^{-4}$
Ruscellamento hortoniano	ore	$10^{-1} \div 10$
Ruscellamento per saturazione	ore	$1 \div 10$
Deflusso ipodermico	ore – giorni	$10^{-3} \div 10^{-2}$
Deflusso nei canali	ore	10^2

Tabella 2.1 Velocità dell'acqua all'interno del bacino

La tabella 2.1 evidenzia che le velocità tipiche nei canali sono di qualche ordine di grandezza maggiori di quelle dei versanti, significando che i versanti esercitano, almeno nei piccoli bacini, un controllo non trascurabile sulla struttura dell'onda di piena.

I modi di deflusso riconosciuti nei versanti sono essenzialmente di tre tipi distinti:

- il deflusso hortoniano, causato dal superamento della capacità di infiltrazione dei suoli;
- il deflusso superficiale su suoli saturi;
- il deflusso subsuperficiale o ipodermico: avviene nei primi strati di suolo e può raggiungere valori consistenti di portata qualora siano presenti strutture canalicolari dette macropori.

Nei climi temperati o umidi, la maggior parte del deflusso avviene con la modalità b) o c). Il deflusso hortoniano contribuisce per meno del dieci per cento del totale. Un esempio dei diversi contributi è dato dalla Figura 2.1 (da Dunne, 1978).

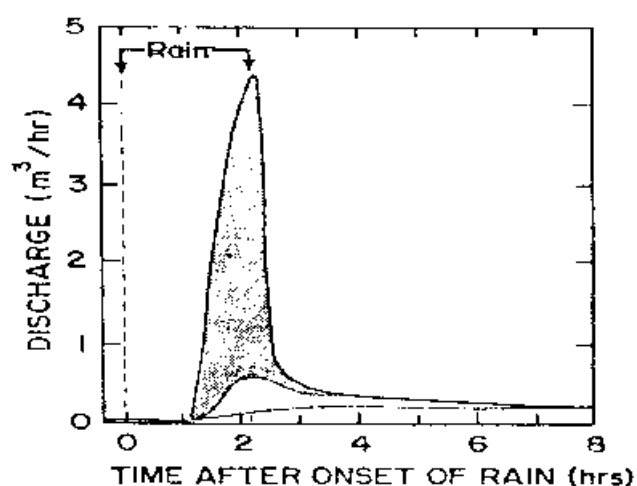


Figura 2.2 Esempio di modi di deflusso nei versanti

Il deflusso hortoniano comporta la formazione di un fronte di saturazione nella parte superiore



dei suoli, e una sua propagazione verso il basso fino a raggiungere uno strato di roccia impermeabile o una falda. La conduttività dei suoli è generalmente molto alta rispetto all'intensità delle piogge, anche estreme. Pertanto, le zone di deflusso hortoniano sono limitate in quelle parti del bacino dove affiorino formazioni rocciose non fessurate e poco permeabili o dove i suoli abbiano subito processi di laterizzazione superficiale. Non essendo generalmente queste parti di bacino connesse direttamente con la rete idraulica, va anche contemplata la possibilità che il deflusso hortonianamente generato si rinfiltri a valle in zone di terreno a più alta conduttività. Il contributo al coefficiente di deflusso dovuto a queste zone, ϕ_H , si può pertanto ritenere non variabile con l'intensità degli eventi.

Il meccanismo di deflusso per saturazione ha spesso origine primaria nella diminuzione di conduttività idraulica con la profondità. Ciò causa, per una determinata intensità di pioggia, la formazione di uno strato di suolo saturo posto ad una profondità minore di quella della falda freatica o dello strato roccioso impermeabile, e quindi una falda temporanea e sospesa (perched water table) il cui limite superiore si propaga con il progredire dell'evento meteorico verso l'alto, sino a raggiungere la superficie del suolo. Le zone in cui questo meccanismo di saturazione agisce sono topograficamente localizzate nelle zone concave del bacino in prossimità dei corsi d'acqua e, nei climi temperati, producono un'area di saturazione che si espande e si contrae con le stagioni.

La ragione di ciò sta nel fatto che il volume d'acqua immagazzinato nei suoli si muove per effetto della legge di Darcy dalle zone a pendenza alta a quelle a pendenza minore con velocità medie per proporzionali alle pendenze. La portata massima che potrà defluire attraverso il suolo dipenderà, oltre che dalla permeabilità e dalla pendenza, dallo spessore di suolo presente. Risulterà dunque dall'integrazione sulla verticale dell'equazione di Darcy e, assumendo la direzione del moto parallela alla topografia, risulterà:

$$q_{\max} = T \nabla z(x, y)$$

$$T(x, y) = \int K_s(x, y, z) dz$$

dove T è chiamata trasmissività, K_s è la permeabilità alla saturazione, z al contempo la direzione verticale e la superficie del terreno, $z(x, y)$ la pendenza e q_{\max} una portata per unità di lunghezza. La conoscenza accurata della topografia ci permetterebbe, conosciuto anche il campo $T(x, y)$, di riconoscere quei punti per i quali $Q > q_{\max}$, ovvero è avvenuta la saturazione



e quindi si ha deflusso superficiale. In realtà il campo $T(x,y)$ conserva i caratteri di aleatorietà della permeabilità da cui dipende e dello spessore di suolo, cosicché non si è in grado di ottenere che risultati di natura statistica: in particolare la probabilità di superamento $P[X > q_{\max}]$ che eguaglia la porzione di deflusso dovuta a saturazione del terreno espressa da un coefficiente di deflusso ϕ_D :

$$P[X > q_{\max} \equiv T \nabla z] = \phi_D$$

Nella misura in cui ciascun evento poco contribuisce all'accrescersi di ϕ_D e invece questo risulta dalla dinamica a scala temporale stagionale descritta appena sopra, esso può essere determinato a partire da un bilancio idrologico sufficientemente accurato.

Tra il deflusso subsuperficiale e il deflusso superficiale dovuto a saturazione vi è un legame evidente: quanto più alta è la trasmissività tanto minore sarà il deflusso superficiale e viceversa. Dunque se ϕ_D diminuisce, aumenta ϕ_S , la porzione di deflusso subsuperficiale.

Globalmente il coefficiente di deflusso complessivo potrà pensarsi come somma di tre componenti:

$$\phi = \phi_H + \phi_D + \phi_S$$

La quantità di pioggia proporzionale a $(1-\phi)$ si suddivide in evapotraspirazione, intercettazione e ricarica delle falde freatiche e artesiane.

2.1.3 I MODELLI DI PIENA PER TEMPI DI RESIDENZA

2.1.3.1 Introduzione

Assegnata (o ricostruita) la geografia e la topografia del bacino, al fine di ottenere la risposta idrologica, è preferibile attuare un cambiamento di prospettiva assoggettando il deflusso all'analisi per tempi di residenza.

La formulazione del trasporto per tempi di residenza" [Rodriguez-Iturbe e Rinaldo, 1994; Rinaldo 1994] è legata all'idea che la portata complessiva, misurata ad una certa sezione di



chiusura, si possa pensare come la somma dei contributi di volumi elementari di pioggia i quali concorrano, per gli effetti complessivi delle eterogeneità fisiche e dinamiche del sistema (riconducibili a dinamiche di tipo turbolento), a formare tale portata secondo leggi di natura statistica.

La trattazione "per tempi di residenza" fa pertanto riferimento a funzioni di distribuzione di probabilità relative ai tempi di residenza entro volumi confinati come la teoria dell'idrogramma istantaneo unitario, e ne rappresenta al contempo una generalizzazione capace di descrivere fenomenologie assai più complesse.

Tre sono gli ingredienti principali di questa analisi:

- la dimostrazione dell'equivalenza rigorosa tra funzioni di distribuzione dei tempi di residenza all'interno di un bacino di controllo e (valore atteso delle) portate specifiche alla chiusura;
- la traduzione formale delle relazioni esistenti tra le varie parti del sistema (usualmente denominate stati) in quella che usualmente si identifica con l'acronimo GIUH (idrogramma istantaneo unitario geomorfologico) e la possibile differente identificazione degli stati;
- la determinazione della forma funzionale delle singole distribuzioni dei tempi di residenza in base a considerazioni sull'idraulica dei moti in ambiente naturale.

2.1.3.2 Equivalenza di portate specifiche e distribuzione dei tempi di residenza

Supposto identificato il volume di controllo relativo ad una chiusura, si consideri il relativo bacino suddiviso in parti, ciascuna identificata da un tempo di residenza T_i . Tale suddivisione è dettata dalla quantità di dati morfologici e idrologici disponibili e dalla possibilità di elaborarli in maniera obiettiva. Il volume dell'acqua all'interno del medesimo bacino all'istante iniziale sia:

$V(0) = \sum_r V_r$, ove con r si indichino i singoli "volumi elementari" d'acqua. Si definisca inoltre la funzione indicatrice, $I_k(t)=1$ se il volume k -esimo è all'interno del bacino al tempo t , oppure $I_k(t)=0$ se è fuoriuscito dalla sezione di controllo. Allora:

$$V(t) = \sum_k V_k I_k(t)$$

$$E[V(t)] \sim E[I_k(t)] \sum_k V_k = E[I_k(t)] V(0)$$



dove $E[\cdot]$ indica il valore atteso; il volume elementare generico, V_k , è costante e soprattutto i singoli volumi hanno tempi di residenza identicamente e indipendentemente distribuiti. $E[I_k(t)]$ è una funzione di t il cui valore è compreso nell'intervallo $[0,1]$ e rappresenta la frazione di volumi elementari all'interno del bacino all'istante t . Ne consegue:

$$E[V(t)] = V(0) P[T > t]$$

Dove $P[T > t]$ sta ad indicare la probabilità che il tempo di residenza all'interno del volume sia maggiore di una quantità prefissata t . Le precedenti equazioni si leggono dicendo che il valore atteso del volume d'acqua all'interno del bacino è proporzionale alla probabilità del tempo di residenza dell'acqua all'interno del bacino, essendo la costante di proporzionalità il volume invasato nell'istante iniziale. D'altra parte il bilancio di massa all'interno del volume di controllo è espresso da:

$$\frac{dV(t)}{dt} = -f(t) \quad t > 0$$
$$J_{\text{eff}}(t) = V(0)\delta(t)$$

dove $f(t)$ è la portata uscente e qualora tutta la massa sia iniettata nel volume di controllo all'istante iniziale $t=0$. Ai volumi e alle portate si può sostituire il loro valore atteso se si fa riferimento al loro comportamento statistico causato dalla eterogeneità dei mezzi porosi e dalla dinamica turbolenta nei canali. Quindi la prima delle due equazioni precedenti diviene:

$$-q(t) \equiv \frac{1}{V(0)} \frac{dE[V(t)]}{dt} = \frac{dP[T > t]}{dt} = \frac{d(1 - P[T < t])}{dt} = -\frac{d(P[T < t])}{dt} = -g(t)$$

dove $q(t)$ è il volume specifico uscente dalla sezione di controllo ($q(t)=f(t)$ per $V(0)=1$) e $g(t)$ è la distribuzione dei tempi di residenza dei singoli volumi all'interno del bacino. Risulta così dimostrato [Gupta e al., 1980] che la distribuzione dei tempi di residenza dei volumi d'acqua all'interno del volume di controllo è esattamente uguale alla portata specifica fluente dal volume medesimo.



2.1.3.3 Descrizione geometrica del bacino: il modello geomorfologico

La dispersione, a cui è soggetto ogni trasporto nei mezzi naturali e in particolare il trasporto nelle zone non canalizzate della rete, rende impossibile distinguere il tempo di residenza di due gocce, e loro da molte altre, che siano cadute in un' "area di influenza" attorno ad una certa distanza dalla sezione di chiusura del bacino qualunque sia la risoluzione temporale alla quale si osserva il fenomeno.

In generale dunque in un bacino si potranno distinguere più regioni di dimensioni finite omogenee (dove il criterio di omogeneità ha un significato sia fisico che pratico) descrivibili ciascuna con un tempo di residenza caratteristico T_i e da una corrispondente distribuzione di probabilità.

Sarà così necessario seguire le gocce di pioggia nel proprio cammino attraverso stati dotati di tempi di residenza differente. Se o_i identifica gli stati al di fuori della rete, c_i identifica gli stati nella rete e c_Ω denota la chiusura del sistema, ogni percorso si potrà identificare con un diagramma:

$$o_i \rightarrow c_1 \rightarrow \dots \rightarrow c_j \rightarrow \dots \rightarrow c_\Omega \quad j = 2, \dots, \Omega - 1$$

dove si è fatta anche l'assunzione, non necessaria ma semplificatrice, che la pioggia cada sempre al di fuori della rete, trascurando quindi il contributo proprio della superficie della rete. Si supponga inoltre che

- la sola possibile transizione degli stati o_i sia del tipo $o_i \rightarrow c_j$ per qualche j
- la sola possibilità di transizione degli stati c_j sia del tipo $c_j \rightarrow c_i$
- a stati differenti corrispondano variabili stocastiche indipendenti, fatto questo fisicamente plausibile, ma non necessario allo sviluppo della teoria.

Durante il loro percorso sino alla uscita i volumi elementari di pioggia spenderanno un certo ammontare di tempo nel generico stato j -esimo. Il tempo di residenza complessivo sarà dunque la somma dei singoli tempi di residenza negli stati i, j, \dots, k che ne costituiscono il



percorso:

$$T = T_i + T_j + T_k + \dots + T_\Omega$$

Nell'importante caso dell'indipendenza statistica dei tempi T_j la distribuzione di probabilità complessiva è determinata quindi dalla convoluzione delle singole distribuzioni di probabilità:

$$f(t) = f_{t_j} * f_{t_i} * f_{t_k}$$

dove stati differenti possono assumere pdf differenti, (in generale $f_{t_j} \neq f_{t_k}$).

Pertanto l'espressione generale dell'idrogramma derivante dall'analisi della struttura geomorfologica è [Rodriguez-Iturbe e Valdes, 1979]:

$$f(t) = \sum_{\gamma \in \Gamma} p(\gamma) f_{x_\omega} * \dots * f_{x_\Omega}$$

dove γ è il cammino connesso costituito dagli stati $x_\omega \dots x_\Omega$ interessati al passaggio di ogni "particella" d'acqua; Γ è l'insieme di tutti i possibili cammini; l'asterisco denota l'operazione di convoluzione e, se la distribuzione delle piogge è spazialmente uniforme, $p(\gamma) = A_{x_\omega} / A$ se A_{x_ω} e A sono rispettivamente l'area afferente allo stato ω e l'area totale del bacino. Casi di distribuzione spaziale delle piogge possono essere facilmente descritti.

Per ottenere la portata alla sezione di controllo $f(t)$ deve essere convoluta con le piogge efficaci.

2.1.3.4 Un modello semplice per il calcolo dei tempi di residenza nei versanti.

Il tempo di residenza dei volumi d'acqua nei versanti è il risultato di un insieme molto complesso di fenomeni: i processi di infiltrazione e i processi di deflusso subsuperficiale, i processi di deflusso superficiale per ruscellamento causato da piogge intense che eccedono la capacità di infiltrazione del terreno e ruscellamento nelle zone sature a bassa pendenza dei bacini. Uno dei modelli più semplici che si riesca immaginare di tempo di residenza è quello di assumere un modello elementare di separazione del deflusso e descrivere la dinamica



attraverso una funzione di distribuzione esponenziale:

$$f(t) = e^{-t/\lambda}$$

$$\lambda = \alpha A^\beta$$

dove però la costante λ è fatta dipendere dall'area contribuyente del bacino. La scelta della curva esponenziale risponde ad un carattere di semplicità e ad una modellizzazione del versante come un invaso lineare. Il fatto invece di assumere λ variabile con l'area del bacino contribuyente si richiama ad uno studio sperimentale effettuato da Boyd [1978]. In tale studio le costanti furono stimate essere: $\beta=2.51$ $\lambda=0.38$ se il tempo è espresso in ore. La semplificazione estrema di questo modello risponde quindi in qualche modo alle effettive caratteristiche dei bacini reali. Il valore di $\beta=2.51$ mostra come il tempo di residenza al di fuori della rete è dell'ordine delle ore.

2.1.3.5 I tempi di residenza nella rete idraulica

All'interno dei canali, qualora non siano disponibili rilievi delle sezioni dell'alveo, e quindi ci si trovi nell'impossibilità di integrare le equazioni di de Saint Venant, si può procedere applicando l'approssimazione dell'onda parabolica.

In generale nei fenomeni di piena, si possono ritenere valide le condizioni generali in cui vale la semplificazione unidimensionale delle equazioni dinamiche (equazione di de Saint Venant):

$$i_e = i_f - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{1}{g} V \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x}$$

Da queste, esplicitando la pendenza del pelo libero i_e con la formula di Chèzy (e quindi χ sia l'opportuno coefficiente e R_H sia il raggio idraulico), posto anche $h=z+y$ essendo h l'altezza

relativa ad un livello di riferimento, y l'altezza idrometrica, z l'altezza del fondo, $i_f \approx - \frac{\partial z}{\partial x}$, la

pendenza del fondo identificabile con la variazione negativa di elevazione qualora tale pendenza sia piccola e g l'accelerazione di gravità si ottiene:



$$V = \chi \sqrt{R_H \left(i_f - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{1}{g} \frac{V \partial V}{\partial x} \right)} \quad (a)$$

Il problema della soluzione delle equazioni precedenti presenta due ordini di complessità: i) le condizioni al contorno dell'equazione devono essere scritte per un sistema di canali dalla struttura topologica complessa in cui l'afflusso in testa ad ogni canale è in ogni istante il prodotto dell'afflusso proveniente dai canali che vi afferiscono; ii) dei canali sono spesso note con grande approssimazione le caratteristiche di scabrezza e la geometria delle sezioni.

A questo stato di ignoranza vengono in aiuto alcune considerazioni di carattere empirico che permettono di semplificare opportunamente l'equazione completa in (a). Si è verificato teoricamente e sperimentalmente [Pilgrim, 1977] che dei vari termini, nel decorso di una piena, solo i primi due termini danno un contributo effettivo al calcolo della propagazione dell'onda di piena e si può considerare pertanto l'equazione semplificata:

$$V = \chi \sqrt{R_H \left(i_f - \frac{\partial y}{\partial x} \right)}$$

Accoppiando la equazione con l'equazione di continuità, si ottiene [Henderson, pag 375; Rinaldo e al., 1991] la così detta approssimazione parabolica della equazione di Saint Venant:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial t} + C \frac{\partial q}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 q}{\partial x^2}$$

$$C = \frac{3}{2} \chi \sqrt{R_H \left(i_f - \frac{\partial y}{\partial x} \right)}$$

$$D_L = \frac{B}{C y (i_f - \partial y / \partial x)} \approx C \frac{y}{3 i_f}$$

La soluzione della precedente equazione è analiticamente conosciuta per molte condizioni al contorno e, per numeri di Peclet > 10 è approssimata da [Rinaldo e al., 1991]:

$$f(t) = \frac{L}{4(\pi D_L t^3)^{1/2}} e^{-\frac{(L-ut)^2}{4D_L t}}$$



La caratteristica peculiare della equazione precedente è che, misurata in sezioni a distanza diversa dal punto di imbocco nel canale, essa mostra sia effetti propagatori che diffusivi. E' questo l'effetto caratteristico del termine diffusivo dipendente dal tempo $D_L t$ che permette di distinguere le onde di piena di bacini di grandi dimensioni da quelle di piccole dimensioni. Nei bacini di piccole dimensioni gli effetti dispersivi sono minori e di conseguenza la risposta idrologica conserva la struttura irregolare della funzione di ampiezza in bacini grandi la risposta idrologica è invece addolcita.

La soluzione gode anche della proprietà di essere chiusa rispetto alla convoluzione se D_L e u rimangono costanti nei vari stati (dove dunque varia solo L). Questo fatto permette di ottenere alcune conclusioni quantitativamente approssimate, ma qualitativamente corrette, che pongono in luce l'importanza della struttura morfologica dei bacini nella determinazione dell'onda di piena.

Si supponga infatti, a scopo semplificativo, di poter trascurare i tempi di residenza fuori della rete. Allora il tempo di residenza all'interno del bacino è completamente descritto da [Rigon, 1992]:

$$f(t) = \frac{L}{4(\pi D_L t^3)^{1/2}} \sum_{i=1} W(i) e^{-\frac{(L_i - ut)^2}{4D_L t}}$$

dove $W(i)$ è la funzione di ampiezza discretizzata in d intervalli $\Delta x = u \Delta t$.



2.2 *Modello idrodinamico*

2.2.1 INTRODUZIONE

Una vasta gamma di moti a superficie libera, in particolare nei corsi d'acqua, nei canali artificiali e nei canali lagunari può essere descritta e quantificata adottando il modello di corrente, individuando cioè la direzione prevalente del moto.

Definite le sezioni come intersezioni della corrente con piani ortogonali alla linea di corrente, detta direzione longitudinale, per descrivere il moto si fa riferimento a grandezze dinamiche mediate nel piano della sezione.

Queste grandezze forniscono una descrizione sintetica del moto sufficiente per la gran parte degli scopi tecnici. In particolare per questo lavoro si è ritenuto che l'utilizzo di un modello unidimensionale fosse sufficientemente accurato e rispondesse alle esigenze, già ricordate, circa l'impiego di risorse e l'ampio campo di applicabilità.

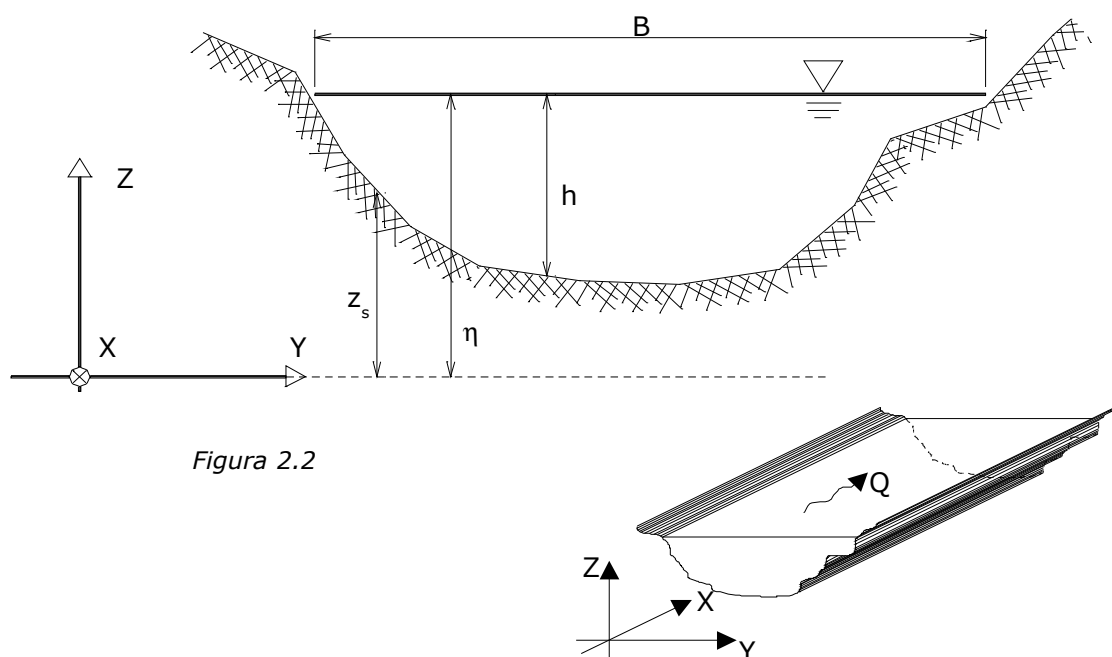


Figura 2.2



Per garantire l'affidabilità del risultato lo schema unidimensionale può essere adottato sotto alcune condizioni che devono essere verificate:

- la curvatura dell'asse della corrente deve essere molto piccola in modo che i moti secondari siano trascurabili
- le variazioni spaziali della forma della sezione devono essere sufficientemente lente in modo da non violare l'ipotesi di quasi – unidirezionalità della corrente.

A partire dalle equazioni di Reynolds, con le ipotesi di moto unidimensionale e mediando sulla sezione, e dall'equazione di continuità si ricavano [Dallago, 1993] le equazioni note come equazioni di de Saint Venant.

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha u Q) + g A \frac{\partial \eta}{\partial x} + g i_E A = - q \frac{Q}{A} \\ B \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \end{cases} \quad (2.1)$$

Dove in accordo con lo schema di Figura 2.2 si sono definiti:

u [m/s]	velocità media della corrente
A [m ²]	area della sezione bagnata
B [m]	larghezza, in direzione trasversale, della superficie libera
Q [m ³ /s]	portata attraverso la sezione trasversale
q [m ² /s]	portata laterale per unità di lunghezza
η [m s.m.m.]	quota della superficie libera
α	coefficiente di Coriolis che vale: $\alpha = \frac{A}{Q^2} \iint_A u^2 dA$
i_E	perdita di energia che si assume valere $i_E = \frac{Q^2}{A^2 k_s^2 R_H^{4/3}}$
R_H [m]	raggio idraulico della sezione trasversale
k_s [m ^{1/3} /s]	coefficiente di Gaukler – Strickler

Le equazioni di de Saint Venant, forniscono lo schema di calcolo per determinare le variabili idrodinamiche nel caso di moto unidimensionale.



2.2.2 SCHEMA ALLE DIFFERENZE FINITE

Per procedere all'integrazione numerica del modello idrodinamico è necessario suddividere il dominio [Dallago, 1993], costituito dalla coordinata longitudinale del fiume, in segmenti di ampiezza $\Delta x_{i+1/2}$, in generale diversi fra loro, come illustrato nella Figura 2.3

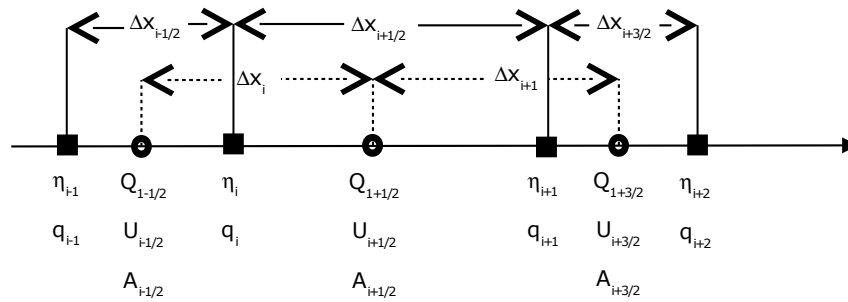


Figura 2.3 Suddivisione del dominio

Le variabili η , q e h sono note agli estremi di tali segmenti, invece Q , u , A e B sono definite nei punti medi. Il loro valore al tempo t_n è indicato come:

$$\eta_i^n = \eta(x_i, t_n)$$

$$q_i^n = q(x_i, t_n)$$

$$h_i^n = h(x_i, t_n)$$

$$u_{i+1/2}^n = u\left(x_i + \frac{x_{i+1} - x_i}{2}, t_n\right)$$

$$Q_{i+1/2}^n = Q\left(x_i + \frac{x_{i+1} - x_i}{2}, t_n\right)$$

$$A_{i+1/2}^n = A\left(x_i + \frac{x_{i+1} - x_i}{2}, \frac{h_i^n + h_{i+1}^n}{2}\right)$$

$$B_{i+1/2}^n = B\left(x_i + \frac{x_{i+1} - x_i}{2}, \frac{h_i^n + h_{i+1}^n}{2}\right)$$

La discretizzazione dei termini delle equazioni 2.1, porge:

con uno schema alle differenze:



$$B \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{B_{i-1/2}^n + B_{i+1/2}^n}{2} \frac{\eta_i^{n+1} - \eta_i^n}{\Delta t} \quad (2.3)$$

con uno schema implicito:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i+1/2}^{n+1} - Q_{i-1/2}^{n+1}}{\Delta x_i} \quad (2.4)$$

$$gA \frac{\partial \eta}{\partial x} = gA_{i+1/2}^n \frac{\eta_{i+1}^{n+1} - \eta_i^{n+1}}{\Delta x_{i+1/2}} \quad (2.5)$$

Il termine dissipativo $g_{iE}A$ viene riscritto nella forma $g_{iE}A = \gamma Q$, dove $\gamma = \frac{u}{K_s^2 R_H^{4/3}}$, e viene considerato semimplicitamente, ovvero

$$\gamma_{i+1/2}^n Q_{i+1/2}^{n+1} = \frac{u_{i+1/2}^n}{K_s^2 (R_{H_{i+1/2}}^n)^{4/3}} Q_{i+1/2}^{n+1}; \quad (2.6)$$

allo stesso modo viene trattato anche il termine qQ/A che coinvolge le portate immesse:

$$q_{i+1/2}^n \frac{Q_{i+1/2}^{n+1}}{A_{i+1/2}^n} \quad (2.7)$$

Per i termini convettivi si ricorre ad un operatore F tale che:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (uQ)}{\partial x} = \frac{Q_{i+1/2}^{n+1} - FQ_{i+1/2}^n}{\Delta t} \quad (2.8)$$

discretizzando il termine $\frac{\partial Q}{\partial t}$ alle differenze in avanti ed il termine $\frac{\partial (uQ)}{\partial x}$ con uno schema alle differenze upwind, si ottiene:

$$FQ_{i+1/2}^n = Q_{i+1/2}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_{i+1/2}} \left[\left(\left| (\alpha u)_{i+1/2}^n \right| + (\alpha u)_{i+1/2}^n \right) \frac{Q_{i+1/2}^n}{2} - \left(\left| (\alpha u)_{i+3/2}^n \right| - (\alpha u)_{i+3/2}^n \right) \frac{Q_{i+3/2}^n}{2} \right. \\ \left. - \left(\left| (\alpha u)_{i-1/2}^n \right| + (\alpha u)_{i-1/2}^n \right) \frac{Q_{i-1/2}^n}{2} + \left(\left| (\alpha u)_{i-1/2}^n \right| - (\alpha u)_{i-1/2}^n \right) \frac{Q_{i-1/2}^n}{2} \right] \quad (2.9)$$

Le equazioni del modello idrodinamico (2.1) discretizzate secondo le (2.3)-(2.9) assumono la forma:

$$\begin{cases} B_i^n \frac{\eta_i^{n+1} - \eta_i^n}{\Delta t} + \frac{Q_{i+1/2}^{n+1} - Q_{i-1/2}^{n+1}}{\Delta x_i} = q_i^n \\ \frac{Q_{i+1/2}^{n+1} - FQ_{i+1/2}^n}{\Delta t} + gA_{i+1/2}^n \frac{\eta_{i+1}^{n+1} - \eta_i^{n+1}}{\Delta x_{i+1/2}} = -\gamma_{i+1/2}^n Q_{i+1/2}^{n+1} - \frac{q_{i+1/2}^n}{A_{i+1/2}^n} Q_{i+1/2}^{n+1} \end{cases} \quad (2.10)$$



L'equazione di conservazione della quantità di moto, isolando la portata incognita si può scrivere come:

$$Q_{i+1/2}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta t} + \gamma_{i+1/2}^n + \frac{q_{i+1/2}^n}{A_{i+1/2}^n} \right) = \frac{FQ_{i+1/2}^n}{\Delta t} - \frac{gA_{i+1/2}^n}{\Delta x_{i+1/2}} (\eta_{i+1}^{n+1} - \eta_i^{n+1}) \quad (2.11)$$

ovvero:

$$Q_{i+1/2}^{n+1} = \frac{1}{(1 + \tilde{\gamma}_{i+1/2}^n \Delta t)} \left[\frac{FQ_{i+1/2}^n}{\Delta t} - \frac{gA_{i+1/2}^n}{\Delta x_{i+1/2}} (\eta_{i+1}^{n+1} - \eta_i^{n+1}) \right] \quad (2.12)$$

dove $\tilde{\gamma}_{i+1/2}^n = \gamma_{i+1/2}^n + \frac{q_{i+1/2}^n}{A_{i+1/2}^n}$. Si noti che vale, per la portata al precedente passo spaziale:

$$Q_{i-1/2}^{n+1} = \frac{1}{(1 + \tilde{\gamma}_{i-1/2}^n \Delta t)} \left[\frac{FQ_{i-1/2}^n}{\Delta t} - \frac{gA_{i-1/2}^n}{\Delta x_{i-1/2}} (\eta_i^{n+1} - \eta_{i-1}^{n+1}) \right] \quad (2.13)$$

Sostituendo nell'equazione di continuità quanto ottenuto in (2.12) e (2.13) e raccogliendo i valori incogniti della quota del pelo libero al tempo t_{n+1} si ottiene un'equazione del tipo:

$$- \frac{C_{i-1/2}^n}{\Delta x_i} \eta_{i-1}^{n+1} + \left(\frac{B_i^n}{\Delta t} + \frac{C_{i-1/2}^n}{\Delta x_i} + \frac{C_{i+1/2}^n}{\Delta x_i} \right) \eta_i^{n+1} - \frac{C_{i+1/2}^n}{\Delta x_i} \eta_{i+1}^{n+1} = N_i^n \quad (2.14)$$

dove:

$$C_{i-1/2}^n = \frac{gA_{i-1/2}^n \Delta t}{\Delta x_{i-1/2} (1 + \tilde{\gamma}_{i-1/2}^n \Delta t)} \quad (2.15)$$

$$C_{i+1/2}^n = \frac{gA_{i+1/2}^n \Delta t}{\Delta x_{i+1/2} (1 + \tilde{\gamma}_{i+1/2}^n \Delta t)} \quad (2.16)$$

$$N_i^n = \frac{B_i^n}{\Delta t} \eta_i^n - \frac{FQ_{i+1/2}^n}{\Delta x_i (1 + \tilde{\gamma}_{i+1/2}^n \Delta t)} + \frac{FQ_{i-1/2}^n}{\Delta x_i (1 + \tilde{\gamma}_{i-1/2}^n \Delta t)} + q_i^n \quad (2.17)$$



Ripetendo questo schema per ogni intervallo spaziale si ottiene un sistema tridiagonale

simmetrico in cui la diagonale inferiore è definita da termini del tipo $-\frac{C_{i-1/2}^n}{\Delta x_i}$, la diagonale

principale da termini del tipo $\frac{B_i^n}{\Delta t} + \frac{C_{i-1/2}^n}{\Delta x_i} + \frac{C_{i+1/2}^n}{\Delta x_i}$ e la diagonale superiore dai termini

$$-\frac{C_{i+1/2}^n}{\Delta x_i}.$$

Il vettore incognito è costituito dall'altezza della superficie libera al tempo t_{n+1} ovvero $[\dots, \eta_i^{n+1}, \dots]$ mentre il vettore dei termini noti è costituito dai termini del tipo N_i^n .

Le proprietà del sistema garantiscono l'esistenza e l'unicità della soluzione che, in questo caso, è stata ricavata utilizzando il metodo del gradiente coniugato.



Dopo aver risolto il sistema è possibile, sostituendo i risultati ottenuti nella (2.12), calcolare i valori incogniti della portata $Q_{i+1/2}^{n+1}$.

2.2.3 CONDIZIONI AL CONTERNO

Da un punto di vista fisico per assegnare le condizioni al contorno bisogna considerare il

numero di Froude $Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$ che rappresenta il rapporto fra la forza di inerzia e di gravità riferite entrambe ad un dato volume del fluido in movimento ed è utilizzato per caratterizzare lo stato del moto: per il moto lento o subcritico vale $Fr < 1$ mentre per il moto rapido o supercritico, $Fr > 1$.

Considerando la velocità relativa di propagazione di una perturbazione elementare \sqrt{gh} si osserva che se $u < \sqrt{gh}$ (moto subcritico) la perturbazione ha due velocità $u \pm \sqrt{gh}$, una positiva ed una negativa, e quindi essa oltre a discendere nel senso del moto risale contro corrente.

Invece se $u > \sqrt{gh}$ (moto supercritico) entrambe le perturbazioni si muovono con velocità positive, possono quindi solo discendere verso valle.

Ne deriva quindi che le perturbazioni che hanno luogo in sezioni caratterizzate da corrente supercritica non possono propagarsi verso monte, avendo infatti velocità positiva si propagano solo nel verso della corrente. Viceversa le perturbazioni che hanno luogo in sezioni caratterizzate da moto lento, si propagano in entrambe le direzioni.

L'utente deve quindi specificare quali sono le condizioni al contorno, ovvero quale tipo di moto si verifichi nelle sezioni iniziale e finale. Alla sezione iniziale deve essere assegnata la portata in ingresso ed eventualmente, in caso di moto rapido, le informazioni sulla quota del tirante. Alla sezione di chiusura, nel caso di moto lento, deve essere assegnata la quota del tirante: o direttamente (fissando ad esempio il livello nel serbatoio di recapito) oppure attraverso l'imposizione di una condizione di moto critico o di moto uniforme. Come già osservato il moto rapido non è fisicamente influenzato dalle condizioni di valle.



Il modello, ovviamente, individua le transizioni di moto che vengono a generarsi all'interno del canale, dovute a varie cause come variazione della pendenza del fondo, variazioni di scabrezza, ecc.

La condizione iniziale non essendo generalmente nota è stata assegnata assumendo nell'istante iniziale le condizioni di moto permanente generate dalla prima portata in ingresso.

Contrariamente a molti altri programmi di calcolo, il codice è stato concepito e testato per funzionare in una grande varietà di condizioni al contorno e per forme delle sezioni sufficientemente generiche, è inoltre prevista la possibilità di assegnare delle immissioni laterali di portata.

2.2.4 IL CODICE DI CALCOLO

Per simulare la propagazione dell'onda di piena è stato scritto un programma in linguaggio C, utilizzando la raccolta di routine Fluidturtle¹ [Rigon e al. 1998]. La struttura del programma è modulare, con il codice suddiviso in più files, per agevolare eventuali aggiunte o modifiche. Lo si può suddividere schematicamente in cinque parti come riportato in Figura 2.4:

- ❑ modulo Principale
- ❑ modulo Idrodinamica
- ❑ modulo Tridiagonale
- ❑ modulo Geometria sezioni
- ❑ modulo Risoluzione sistema

Attraverso il diagramma di flusso riportato in Figura 2.4, dove i numeri fra parentesi indicano la successione delle varie fasi, si può capire come è stato organizzato il programma.

All'avvio sono richiesti data e ora di inizio e fine della simulazione, il file contenente i dati dei rilievi delle sezioni, le condizioni al contorno, le immissioni laterali di portata con i files² dove vengono specificati i rispettivi andamenti temporali [1].

¹ La libreria FluidTurtle è una raccolta di routine ANSI C di allocazione e di gestione di input ed output, create per rendere la programmazione scientifica più semplice, affidabile ed ordinata. In particolare è definito, per le operazioni di i\o, un tipo di file, "turtle.dat", che può essere commentato e permette il collegamento ad altri files. I files di input che sono stati utilizzati per il modello di propagazione sono files "turtle.dat" (vedi appendice).

² Un esempio dei files di dati in entrata è riportato in appendice.



Il modulo Principale acquisisce queste informazioni, ne controlla la congruenza, legge le caratteristiche rilevate delle sezioni e le memorizza in un vettore di strutture doublebin [2a] [2b], apre i files di output e avvia il modulo Idrodinamica, al quale sono passate le condizioni generali della simulazione e i necessari puntatori a files [3].

Il modulo Idrodinamica ha essenzialmente il compito di passare al modulo Tridiagonale i vettori della quota del pelo libero e della portata al tempo t_n [5] e di scrivere i files di output [9]. Prima però devono essere create le condizioni iniziali, assunte come quelle di moto permanente per una portata pari alla prima portata in ingresso; per fare questo si calcola una configurazione di primo tentativo con la funzione Gaukler-Strickler [4a] [4b] e, mantenendo la portata costante, con un processo del tutto simile a quello usato per il calcolo del moto vario [5'] [6'] [7'] [8'], si ottiene la configurazione di moto permanente. Tutte queste grandezze, essendo ora note all'istante iniziale, possono essere passate al modulo Tridiagonale [5] che restituisce i valori calcolati al primo passo temporale [8] pronti per essere scritti sui files di output [9]. Il calcolo procede in questo modo, dai valori noti al tempo t_n a quelli calcolati al tempo t_{n+1} , per tutta la durata della simulazione.

Il modulo Tridiagonale fornisce i valori di portata e tirante al tempo t_{n+1} con la seguente procedura: noti i valori del tirante al tempo t_n [6a], il modulo Geometria sezioni restituisce [6b] l'area e il perimetro bagnati, raggio idraulico, larghezza della superficie libera, il coefficiente di scabrezza e quello di Coriolis, che dipendono esclusivamente dalla forma della sezione e dal valore del tirante.

Vengono quindi calcolati, in funzione delle specifiche condizioni al contorno, tutti gli elementi noti al tempo t_n che compongono il sistema tridiagonale e passati al modulo Risoluzione sistema [7a] che restituisce la soluzione, ovvero il valore del tirante al tempo t_{n+1} . [7b]; si calcolano in seguito anche i nuovi valori di portata.

A questo punto il controllo torna al modulo Idrodinamica che aggiorna i valori delle grandezze al contorno e delle immissioni laterali. Quindi, passando nuovamente al modulo Tridiagonale, si calcolano le grandezze idrodinamiche al passo t_{n+2} ; si procede in questo modo per tutta la durata della simulazione.

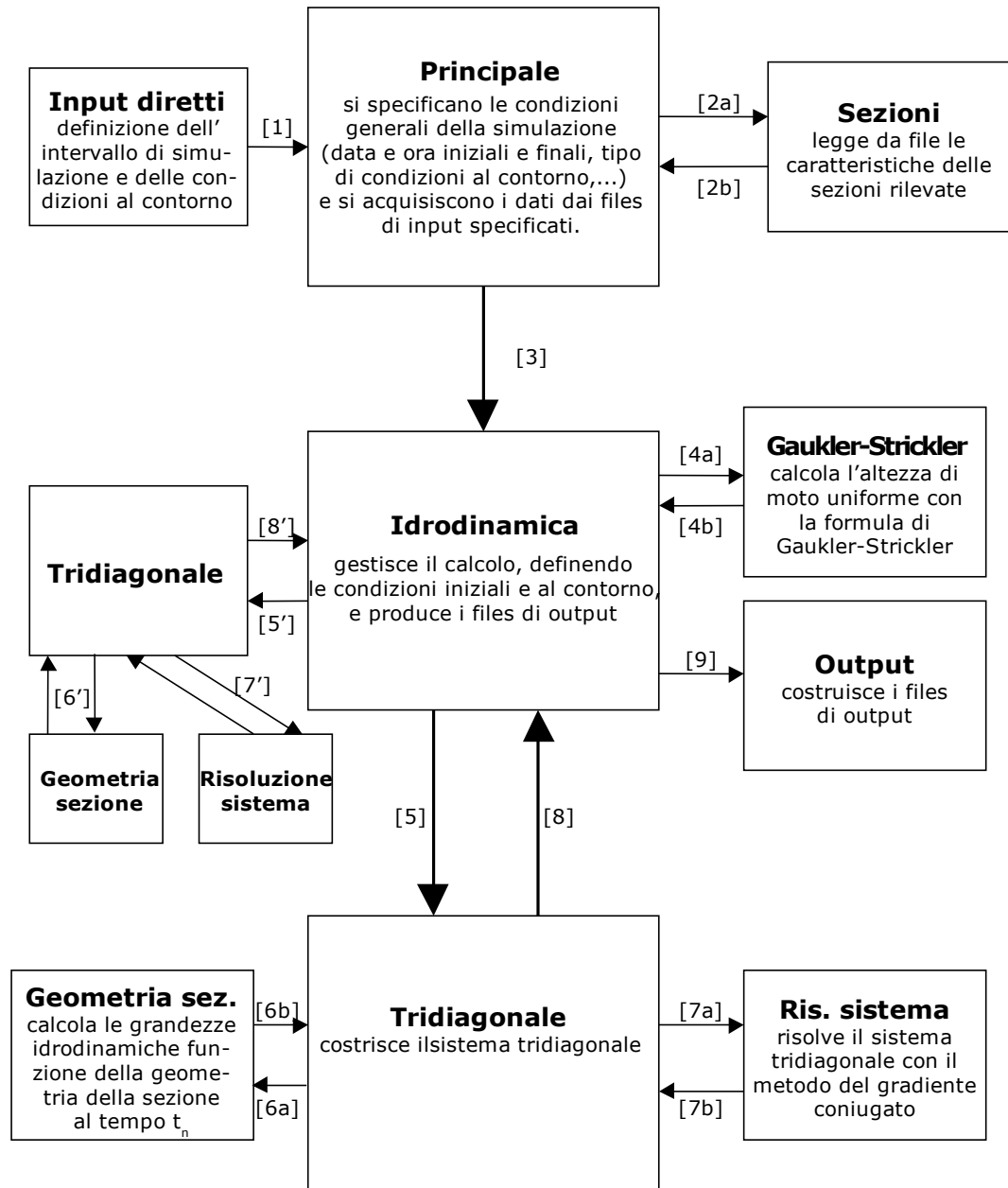


Figura 2.4 Diagramma di flusso del modello di propagazione

Dopo aver illustrato il flusso delle informazioni si può passare alla descrizione più dettagliata di ogni singolo modulo.



□ modulo "Principale":

- 1: definizione della data iniziale e finale della simulazione.
- 2: apertura e lettura del file contenente i dati sulle sezioni.
- 3: scelta delle condizioni al contorno e apertura dei files relativi.
- 4: apertura dei files di output.
- 5: calcolo delle condizioni idrodinamiche.

Il programma lancia due subroutine, una (***sezioni*) per la lettura del file che contiene la descrizione (attraverso il rilievo delle sezioni) del canale in esame e l'altra (*idrodinamica*) per determinare l'idrodinamica nel canale stesso con le condizioni al contorno specificate.

□ modulo "Idrodinamica"

Questo modulo provvede al calcolo delle grandezze idrodinamiche nel canale.

Al programma devono essere passati gli estremi dell'intervallo di simulazione, le caratteristiche geometriche delle sezioni, gli indirizzi dei files nei quali sono indicati le condizioni al contorno considerate e quelli dei files che definiscono le immissioni laterali di portata. Questo modulo si articola in:

- 1: allocazione delle strutture.
- 2: calcolo degli intervalli spaziali.
- 3: lettura delle condizioni al contorno iniziali e delle portate laterali in ingresso.
- 4: generazione delle condizioni iniziali. Si definisce come condizione iniziale la condizione di moto permanente calcolato per una portata pari alla prima portata in ingresso.
- 5: definizione delle condizioni al contorno e delle portate laterali ad ogni istante di tempo t_n . Il tirante al tempo t_{n+1} e' calcolato attraverso la funzione *new_tirante*
- 6: scrittura dei risultati e dei messaggi di allerta nei rispettivi files.

□ modulo "Tridiagonale"

Questo modulo costruisce la matrice tridiagonale utilizzando le grandezze note al tempo t_n . Per ottenere ciò bisogna passare al programma i dati sulla geometria delle sezioni, il numero delle sezioni, il valore del tirante al tempo t_n , gli indirizzi del vettore delle portate e di quello delle velocità, il tipo di condizione di monte e di valle³, il puntatore al valore della portata in ingresso, il puntatore al valore del tirante in ingresso, alla portata in uscita e al tirante in uscita e il puntatore alle portate laterali. Questo modulo si può suddividere in:

³ Le condizioni al contorno di monte e di valle fra cui è possibile scegliere sono, a monte: solo la portata in ingresso, portata e condizione di moto critico nella sezione iniziale oppure tirante idrico iniziale e portata. Le condizioni di valle possono essere: quota della superficie libera del serbatoio di recapito, altezza critica nell'ultima sezione oppure deflusso libero. Tutte queste condizioni possono anche essere variabili nel tempo.



- 1: definizione delle variabili e allocazione delle strutture.
- 2: attraverso la funzione *area_bagnata* si calcolano tutte le grandezze che dipendono dal tirante e dalla geometria della sezione. Viene restituito un puntatore ad una matrice che contiene grandezze area bagnata, perimetro bagnato, raggio idraulico, ... riferite alle sezioni rilevate (i). In seguito le stesse grandezze sono calcolate riferite alle sezioni intermedie (i+1/2) e memorizzate in un'altra matrice.
- 3: calcolo del vettore velocità media sulla sezione al tempo t_n , $u_{i+1/2}^n$.
- 4: calcolo della parte esplicita del termine dissipativo ($\gamma_{i+1/2}^n$) al tempo t_n e nella sezione intermedia.
- 5: calcolo del vettore $FQ_{i+1/2}^n$ applicando l'operatore alle differenze upwind ai termini convettivi
- 6: verifica della condizione di Courant e calcolo del passo temporale di integrazione.
- 7: definizione dei coefficienti della matrice e del termine noto secondo le condizioni di monte e di valle assegnate.
- 8: risoluzione del sistema tridiagonale per ottenere il tirante al tempo t_{n+1} attraverso la chiamata della funzione *ris_sistema*. Questa funzione richiede gli indirizzi dei vettori che definiscono gli elementi della diagonale principale, della diagonale superiore, della diagonale inferiore e del termine noto. Sono inoltre richiesti un vettore che definisca una soluzione di primo tentativo e la dimensione del sistema.
- 9: calcolo della portata e della velocità al tempo t_{n+1} .

□ modulo "Geometria sezioni"

In questo modulo vengono calcolati l'area bagnata, il perimetro bagnato, il raggio idraulico la larghezza della superficie libera e la scabrezza efficace e il coefficiente alfa di Coriolis in ogni sezione, noto il tirante.

La funzione restituisce un puntatore ad una struttura che ha come elementi della i-esima riga le grandezze precedenti relative alla i-esima sezione, nello stesso ordine in cui sono state elencate.

La funzione ha come argomenti: il puntatore al vettore che contiene tutti i tiranti, il puntatore alla struttura che contiene le caratteristiche rilevate delle sezioni e il numero delle sezioni.

L'area bagnata è calcolata come somma dei trapezi che si ottengono tracciando da ogni punto di stazione delle suddivisioni verticali. Il perimetro bagnato è calcolato come somma dei tratti bagnati del fondo alveo. Il raggio idraulico è calcolato direttamente come da definizione. La larghezza della superficie libera coincide con l'altezza dei trapezi definiti per



calcolare l'area bagnata. Il coefficiente di scabrezza efficace, che tiene conto di eventuali differenze di scabrezza all'interno di una stessa sezione, è calcolato con il metodo di Egelund⁴. Il coefficiente α di Coriolis è calcolato come riportato in nota⁵.

□ modulo "Risoluzione sistema"

In questo file sono riunite tutte le funzioni necessarie per risolvere un sistema lineare con il metodo del gradiente coniugato. Nel problema in esame sono generati sempre sistemi tridiagonali, pertanto è stata creata una funzione che trasforma i tre vettori che rappresentano le diagonalì in una matrice quadrata tridiagonale.

Gli unici dati in ingresso che bisogna fornire sono: gli elementi delle diagonalì principale, superiore e inferiore e il vettore dei termini noti.

Viene restituita la soluzione del sistema.

La maggior parte delle funzioni utilizzate in questo modulo sono tratte dal manuale "Numerical Recipes in C" [1992], con alcune piccole modifiche per consentire l'utilizzo con le funzioni e i tipi di dati definiti nelle FluidTurtle.

⁴Metodo di Egelund.: suddivisa la sezione come per il calcolo dell'area bagnata per ogni trapezio si calcola la quantità [a] $K_s(j) \cdot Y(j)^{5/3} \cdot B(j)$ dove:

- $K_s(j)$ è il coefficiente di Gaukler-Strickler per il tratto j-esimo;
- $Y(j)$ è l'altezza idrica nel trapezio j-esimo che si ottiene come rapporto fra l'area del trapezio j-esimo e la relativa larghezza sulla superficie libera;
- $B(j)$ è la larghezza della superficie libera relativa al trapezio j-esimo;

n.b. il raggio idraulico del trapezio j-esimo si ritiene approssimabile con l'altezza idrica, ciò è lecito solo nell'ipotesi di sezione larga;

Il coefficiente di scabrezza efficace si ottiene dividendo la somma di tutte le quantità [a] per $(A \cdot R_H^{2/3})$; dove A ed R_H sono l'area bagnata e il raggio idraulico riferiti all'intera sezione.

⁵ Suddivisa la sezione come per il calcolo dell'area bagnata, per ogni trapezio si calcola la quantità:

[b] $K_s(j)^2 \cdot A(j)^{7/3} / P(j)^{4/3}$ dove:

- $K_s(j)$ è il coeff. di Gaukler-Strickler per il tratto j-esimo;
- $A(j)$ è l'area del trapezio j-esimo;
- $P(j)$ è il contorno bagnato relativo al trapezio j-esimo;

Il coefficiente di Coriolis si ottiene dividendo la somma di tutte le quantità [b] per $(A_{TOT} \cdot K_{STOT}^2 \cdot R_{HTOT}^{4/3})$; dove A_{TOT} , K_{STOT} e R_{HTOT} sono rispettivamente l'area dell'intera sezione, il coefficiente di scabrezza efficace e il raggio idraulico della sezione.

2.2.5 FILES DI INPUT E OUTPUT

L'input più difficile da gestire è senz'altro quello relativo alle caratteristiche geometriche delle sezioni. Per ottenere una gestione efficace, intuitiva e allo stesso tempo poco onerosa per il programma, ogni sezione è stata memorizzata in una struttura di tipo doublebin (una lista di vettori di lunghezza variabile), definita nelle FluidTurtle. Un vettore, i cui elementi sono costituiti da strutture doublebin, consente di memorizzare in ogni elemento tutte le informazioni sulla sezione. In pratica tutto il rilievo è gestito come un semplice vettore!

Questa parte di acquisizione dati viene gestita da un sottoprogramma "sezioni" che provvede anche ad effettuare alcuni controlli sui dati immessi.

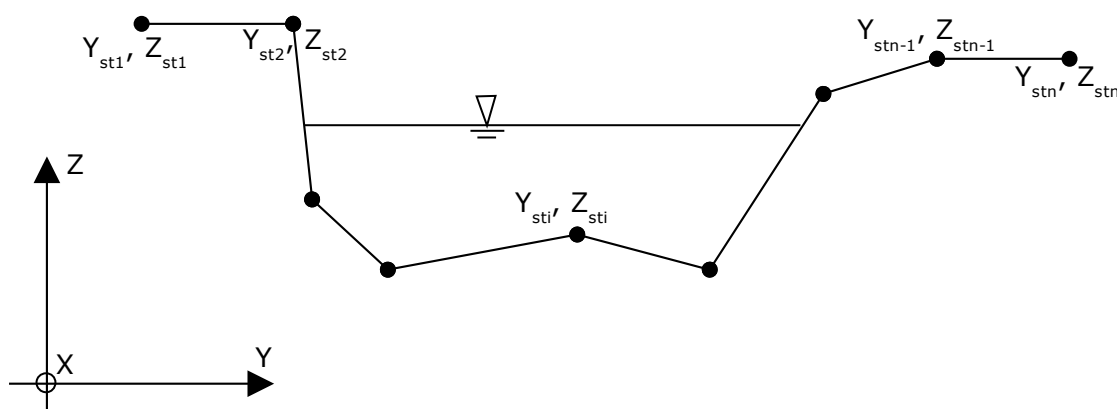
Le liste doublebin che contengono i dati relativi alle sezioni, di cui è riportato un esempio, devono rispettare solo il seguente ordine di scrittura:

riga n.1 della lista = numero delle stazioni

riga n.2 della lista = coordinata x (longitudinale) di ogni punto stazione

riga n.3 della lista = coordinata Y_{sti} (trasversale) di ogni punto stazione

riga n.4 della lista = coordinata Z_{sti} (elevazione) di ogni punto stazione



riga n.5 della lista = valore della scabrezza, uno per ogni tratto o un valore unico

riga n.6 della lista = stazioni che individuano i limiti dell'alveo.

Figura 2.5 Punti stazione di una sezione rilevata



La funzione restituisce un puntatore al vettore di strutture DOUBLEBIN (**sez) nel quale sono memorizzati i dati relativi alle sezioni di calcolo, e un puntatore ad un intero long che specifica il numero di sezioni lette.

Per la scrittura dei dati si utilizza formato, definito anch'esso nelle FluidTurtle, che si rileva molto utile sia per la facilità con cui si possono aggiungere ed eliminare sezioni in qualsiasi punto del canale, sia perché risultano semplici sia la digitazione che la creazione di file di input, come output di altri programmi.

Gli altri tipi di input, condizioni al contorno e immissione di portate laterali, si definiscono

```
/** This_is_a_turtle_file. Author: Angelo Zacchia. Date: 082798. */

index {20} /** indica il numero di blocchi di dati che saranno letti*/

/** iniziamo con le sezioni*/
1: double list sezione_58 {1,1,11,11,1,2} /** numero di elementi di ogni riga /
11      /** numero delle stazioni rilevate /
0      /** coordinata longitudinale della sezione */
0 0 6.8 8.8 14.8 23 39.2 47.2 55.3 62.1 62.1 /** coordinate trasversali dei punti stazione */
39 37.5 34.25 33.65 32.9 32.9 33.2 33.4 34.35 37.3 39 /** coordinate verticali /
35.001 /** coefficiente di scabrezza di Gauckler – Strickler */
1 11 /** punti stazione che individuano i limiti dell'alveo */

2: double list sezione_59 {1,1,11,11,1,2}
11
285
0 2 7.30 8.5 10.7 19 29.8 34 34.5 48 98
33.26 30.97 29.64 30.23 29.49 29.05 29.05 30.16 31.39 32.99 33.99
```

Esempio del file di input utilizzato per l'immissione dei dati sulle sezioni

semplicemente attraverso la data, l'ora e la grandezza in questione. Per esempio nel caso di canale che sfocia in un serbatoio, per definire una quota della superficie libera che varia linearmente un valore iniziale ed uno finale bastano due righe

1997 251 12 34 50.4

1997 251 23 11 51.7



dove 1997 251 è la data di inizio della simulazione 12h37' è l'ora e 50.4 è la quota della superficie libera iniziale e 1997 251 23.11 e 51.7 sono la data, l'ora e la quota della superficie libere finali.

2.2.6 DAL MODELLO UNIDIMENSIONALE A QUELLO BIDIMENSIONALE

Il modello idrodinamico illustrato è un modello semplificato che può servire allo scopo di ottenere una prima indicazione sul comportamento del tratto di asta fluviale in esame. Per avere informazioni più dettagliate sarebbe necessario aggiungere un modulo per il calcolo delle grandezze idrodinamiche nell'ipotesi di moto bidimensionale; inoltre bisognerebbe rimuovere anche le ipotesi di fondo fisso includendo le routine per la valutazione del trasporto di sedimenti.

Dal punto di vista del codice questi aggiornamenti sono possibili ed anzi, nella scrittura del programma si è volutamente mantenuta una struttura estremamente modulare per rendere più agevoli le revisioni e gli aggiornamenti senza dover por mano all'intero codice.

Le difficoltà maggiori che si incontrano volendo usare un modello più sofisticato risiedono probabilmente nel reperimento dei dati necessari alla sua corretta identificazione.

Con il passaggio dal modello mono a quello bidimensionale si potrebbero simulare ad esempio gli effetti di bruschi restringimenti di sezione e della presenza di pile di ponte nell'alveo. Tuttavia in caso di esondazione, che è l'evento più significativo che un sistema di previsione del rischio idraulico vuole cogliere, per ottenere una stima delle aree esondate e della velocità dell'acqua al di fuori dell'alveo sarebbero necessari dei rilievi topografici molto più estesi di quelli disponibili. Per la valutazione delle aree esondabili, come evidenziato nella tesi "Criteri per la determinazione delle fasce di pertinenza fluviale" [Moser 1996], non sono più sufficienti i rilievi delle sezioni dell'alveo, ma occorre estendere il rilievo, con adeguata precisione, anche alle zone esterne. Procedere con un rilievo topografico tradizionale, specialmente nel caso in cui il tratto in esame sia piuttosto esteso, richiederebbe molto tempo ed un notevole impiego di capitale. L'alternativa proposta nel lavoro citato è quella di utilizzare il rilievo aerofotogrammetrico, che necessita di fotogrammi appartenenti a strisciate effettuate ad altezza adeguata.



CAPITOLO 3 CASO DI STUDIO

3.1 *Il bacino del Torrente Nervia*

3.1.1 U B I C A Z I O N E

Il bacino del torrente Nervia occupa, insieme con quello del fiume Roya, la porzione più occidentale della provincia di Imperia.

Geograficamente compreso fra le latitudini $43^{\circ} 47' N$ e $44^{\circ} N$ e le longitudini $7^{\circ} 34' E$ e $7^{\circ} 46' E$.



Figura 3.1 Ubicazione del bacino del torrente Nervia

Dal punto di vista amministrativo il suo territorio è suddiviso nei comuni di Camporosso, Dolceacqua, Isolabona, Apricale, Perinaldo, Baiardo, Rocchetta Nervina, Pigna, Castel Vittorio, San Biagio della Cima e Triora (limitatamente ad una porzione di crinale trascurabile).

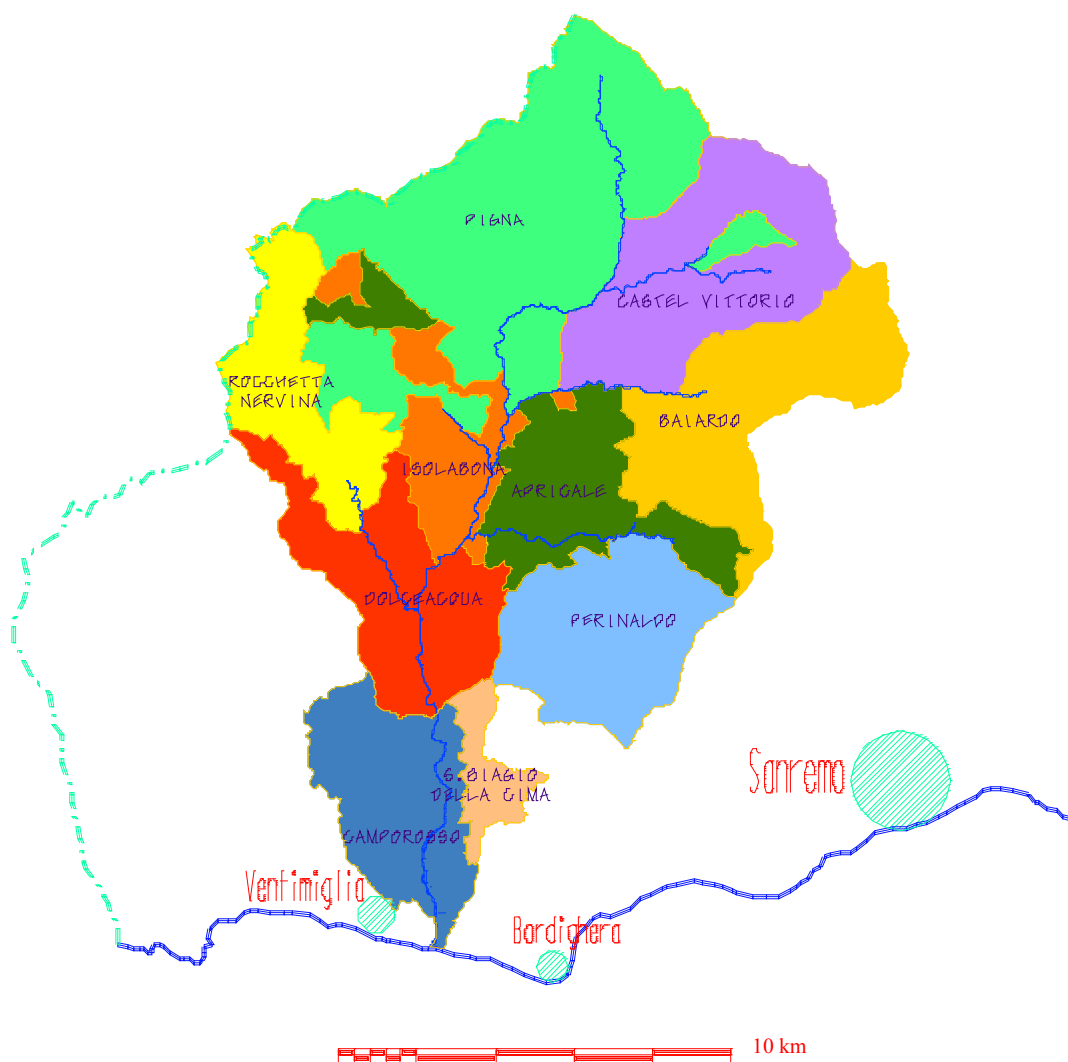


Figura 3.2 Suddivisione amministrativa del territorio



3.1.2 SISTEMA FISICO

3.1.2.1 Caratteristiche morfologiche

Il bacino del torrente Nervia ha una superficie complessiva di circa 185 km² e si estende da zero a 2038 m s.m.m. (dalla foce al Monte Pietravecchia).

Dal punto di vista amministrativo il territorio appartiene per il 43% ai due comuni dell'alta valle: Pigna e Castel Vittorio, per il 36% ai quattro comuni della media valle (Isolabona, Rocchetta Nervina, Apricale e Dolceacqua); il resto appartiene ai comuni che solo parzialmente ricadono nel bacino: Camporosso ricade nel bacino del Nervia per il 68% del proprio territorio e per la totalità dell'abitato, Baiardo e Perinaldo, i cui abitati sono edificati sullo spartiacque, hanno all'interno del bacino il 70% e il 29% del loro territorio mentre San Biagio della Cima (49% del territorio nel bacino del Nervia) ha il centro abitato nel bacino del torrente Vallecrosia.

Comune	Superficie (ha)	Comune	Superficie (ha)
Apricale	1977.1	Isolabona	1202.4
Baiardo	1700.2	Perinaldo	583.4
Castel Vittorio	2589.3	Pigna	5368.6
Camporosso	1214	Rocchetta Nervina	1506
Dolceacqua	2056	S. Biagio della Cima	216.9
* All'interno del bacino ricadono anche circa 30 ha del Comune di Ventimiglia e 80 ha del Comune di Triora			

Tabella 3.2 Suddivisione amministrativa della superficie del bacino

Un'idea immediata del paesaggio e dei rilievi che caratterizzano la Val Nervia si può ottenere attraverso l'analisi della carta delle isoipse (Figura 3.3); allo stesso modo, ma ponendo l'attenzione sulle attività umane in rapporto all'orografia, può risultare utile la carta delle fasce altimetriche realizzata estraendo dalle tavolette 1:25000 alcune curve di livello e retinando le aree così ottenute (Figura 3.4).

Il territorio del bacino risulta suddiviso fra le diverse fasce altimetriche come riportato in, si noti che solo il 27% della superficie ha una quota inferiore ai 400 m s.m.m., l'altezza media è di 666 m s.m.m.

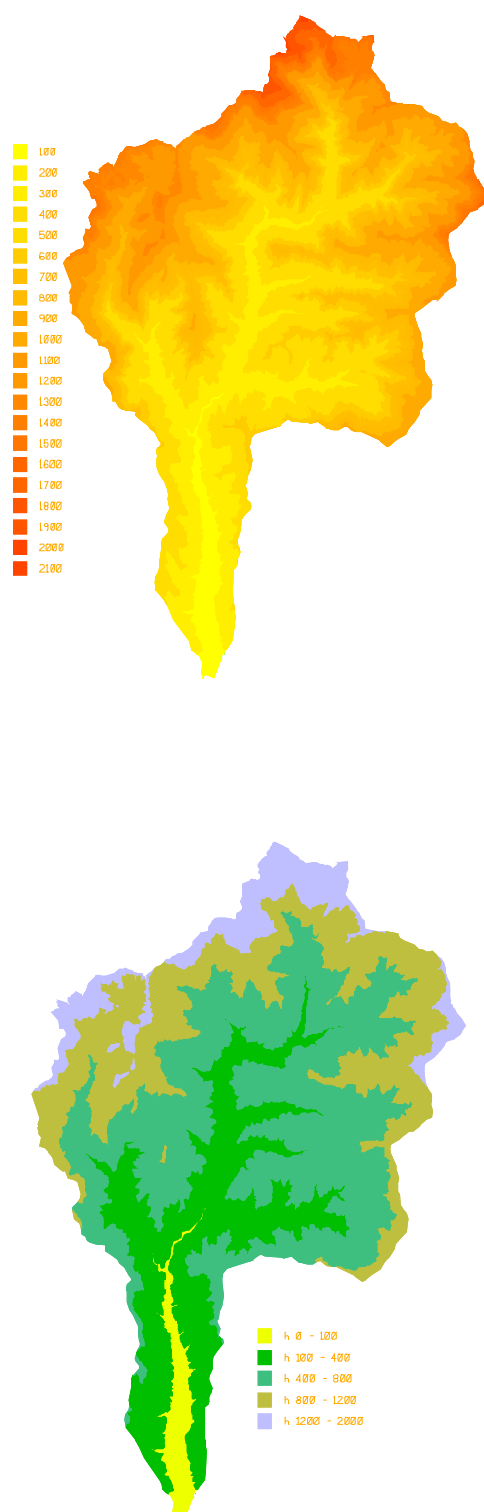


Figura 3.4 Carta delle fasce altimetriche



Fascia altimetrica (m s.m.m.)	Superficie (ha)	percentuale
Inferiore 100 m	662.3	3.5
Compresa fra 100 e 400 m	4397.8	23.6
Compresa fra 400 e 800 m	7185.3	38.6
Compresa fra 800 e 1200 m	4687.8	25.5
Superiore a 1200 m	1681.0	9.1

Tabella 3.3 Superficie delle singole fasce altimetriche

Il torrente Nervia ha orientamento nord sud per l'intero percorso tranne un breve tratto orientato ovest est nei pressi dell'abitato di Pigna.

La lunghezza totale dell'asta fluviale è di 28.3 km; nasce dalle pendici del M. Pietravecchia a quota 1900 m s.m.m. col nome di Rio delle Tane, che diventa T. Nervia poco a monte dell'abitato di Buggio dopo la confluenza col Rio dell'Incisa e il Rio dell'Arme. I suoi principali affluenti sono : il Rio Gordale in sponda sinistra un chilometro a monte dell'abitato di Pigna, il Rio Rosci (6) in sponda destra, il T. Bonda (4) in sponda sinistra nel tratto tra gli abitati di Pigna e Isolabona; il T. Merdanzo (7) in sponda sinistra all'altezza dell'abitato di Isolabona; il T. Barbaira (8) in sponda destra circa un chilometro a monte dell'abitato di Dolceacqua

Le caratteristiche salienti dei citati sottobacini sono riportate nello schema seguente:

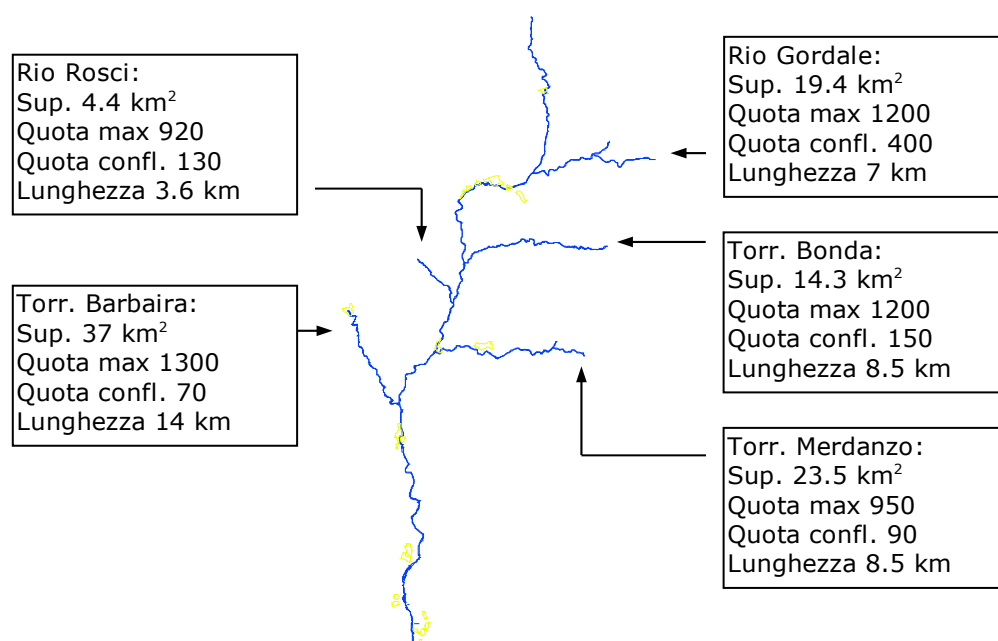


Figura 3.5 Schema dei principali affluenti del torrente Nervia

Il nodo orografico più importante del bacino è quello composto dal M. Pietravecchia (2.038 m



s.m.m.), M. Grai (2.012 m), M. Toraggio (1.979 m).

Dal gruppo Grai-Pietravecchia il crinale più importante, proveniente dal M. Saccarello (2.200 m s.m.m.), si dirama nelle due linee di cresta minori che verso sud ovest e sud est delimitano il bacino imbrifero del Nervia. Lo spartiacque che ha direzione SW e poi sud separa il bacino del torrente Nervia da quello del fiume Roya. Quella in direzione SE separa invece il bacino del Nervia da quello del torrente Argentina e poi piegando verso SW da quelli dei torrenti Arnea, San Romolo e Vallecrosia.

I monti più elevati degli spartiacque laterali, a loro volta nodi orografici minori, sono: sul versante sinistro il M. Ceppo (1.627 m s.m.m.) e il monte Bignone (1.399 m); sul versante destro il M. Lega (1.556 m s.m.m.) la punta dell'Arpetta (1.612 m), la Testa dell'Alpe (1.587 m), il M. Abelio (1.016 m).

Sulla sinistra orografica, alla quota di 1.319 m s.m.m. è stato creato, in un recente passato, a cura dell'Azienda Autonoma Municipalizzata Acquedotto ed Impianti Elettrici (A.A.M.A.I.E.) di Sanremo, per l'approvvigionamento idrico della città, un invaso (loc. Tenarda) della capacità effettiva di 1.500.000 m³ ed utilizzabile di 1.200.000 m³ il cui scarico è posto a monte dell'abitato di Buggio

3.1.2.2 Assetto geologico e litologia superficiale

Il bacino del Torrente Nervia è caratterizzato geologicamente da formazioni di tipo sedimentario con alta percentuale di facies flysciodi. Procedendo da ovest verso est si incontra dapprima la serie autoctona mezoico-terziaria dell'Argentera-Mercantour caratterizzata da termini basali prevalentemente calcarei e marnosi con copertura flysciode.

La serie suddetta affiora su tutta la sinistra idrografica del Torrente Nervia e su buona parte di quella destra.

All'estremo margine orientale del bacino appare il fronte della falda del Flysch ad Helminthoidi (Cretaceo superiore), in posizione alloctona sulla serie precedentemente descritta con contatto diretto o mediante l'interposizione di lembi di serie di dubbia pertinenza paleografica (lembi interposti).

Il tratto terminale del corso d'acqua è occupato, su entrambi i lati, da un complesso prevalentemente conglomeratico di età pliocenico inferiore-media, mentre il fondo valle è occupato da alluvioni terrazzate e mobili.

Le formazioni affioranti superficialmente come riportato nella carta della litologia in Figura



3.6 sono state raggruppate in 5 gruppi a secondo della loro omogeneità litologica. Trattandosi prevalentemente di materiali flyschiodi o di complessi formazionali sedimentari con differenti facies litologiche la classificazione risulta necessariamente approssimata il che, in ogni caso, non influisce sensibilmente sulla precisione della suddivisione adottata, tenuto conto anche dei limiti e degli scopi del lavoro. Delle principali litologie presenti nel bacino del torrente Nervia sono evidenziate le caratteristiche litologiche, il grado di alterazione, il tipo di suolo prodotto e la sua evoluzione.

a) Rocce Conglomeratiche

Si rinvencono alla foce del torrente su ambedue gli spartiacque idrografici. Si tratta di conglomerati poligenici in massima parte costituiti da ciottoli calcarei ed arenacei pliocenici a luoghi cementati; contengono al loro interno lenti di argilla e di sabbia. L'evoluzione pedogenetica è controllata in massima parte dalla frazione clastica calcarea: l'azione delle acque di infiltrazione e percolazione, grazie alla buona permeabilità di questo litotipo, favorisce il dilavamento dei materiali più solubili e, tra questi, del carbonato di calcio e degli ossidi di ferro. Questo processo porta ad una veloce decalcificazione ed all'instaurarsi di una progressiva rubefazione, che dona ai suoli su conglomerato una colorazione da giallo-rossastra a rosso-bruna.

b) Rocce Arenaceo-Marnose

Occupano, con la formazione del Flysch di Ventimiglia, la maggior parte del bacino del torrente Nervia, estendendosi dall'abitato di Camporosso fino alla testata della valle. Si tratta di un complesso sedimentario ben stratificato con strati di diverso spessore costituiti da arenarie più o meno cementate e più o meno fini, marnose ed argillose. Dal disfacimento delle arenarie, caratterizzate da abbondanza di minerali instabili (feldspati e carbonati) e dalla presenza preponderante di matrice argillosa, si originano, a seconda della morfologia, rankers di pendio o suoli bruni con diverso grado di lisciviazione e di accumulo di sesquiossidi, in dipendenza delle caratteristiche mineralogiche della roccia di partenza.

c) Rocce Arenacee

In questo gruppo si sono riunite le Arenarie di Bordighera, localizzate sulla cresta dello spartiacque in sinistra idrografica, e la base del Luteziano, caratterizzata da arenarie calcaree e quarziti nei dintorni del Monte Abellio.



Le Arenarie di Bordighera sono delle grovacche quarzoso-feldspatiche più o meno cementate, piuttosto grossolane, talora passanti a microconglomerati. La loro buona permeabilità consente un veloce dilavamento della porzione più fina dei sesquiossidi di ferro. Il colore rossastro dei teneri prodotti è dovuto sia all'accumulo di discrete quantità di ossidi di ferro, sia alla natura sabbiosa del suolo stesso che, con la sua maggiore superficie disponibile esalta l'intensità del colore.

La base del Luteziano caratterizzata da arenarie calcaree e da quarziti ha un comportamento molto simile alle Arenarie di Bordighera, malgrado alcune differenze litologiche. L'evoluzione dei suoli tende in ambedue i casi verso suoli bruni a tessitura sabbiosa.

d) Rocce Marnose, calcareo-marnose e calcaree

Si rinvencono alla testata del bacino e sono particolarmente estese nella zona di Monte Gouta -Monte Giardino. Appartengono alle formazioni dell'Auversiano e del Cretaceo e sono caratterizzate da diverso tenore in calcare ed argilla con conseguente minore o maggiore erodibilità. Nella zona di Monte Abellio le marni dell'Auversiano contengono anche una discreta frazione sabbiosa.

Dove il litotipo è più calcareo l'evoluzione pedologica porta a suoli di tipo rendzinitico brunificato, dove è più argilloso si passa a terre brune calcaree acidificate con fenomeni talora accentuati di decarbonatazione ed humificazione della sostanza organica.

e) Rocce calcaree-Arenacee

Sono rappresentate dai termini stratigraficamente superiori della formazione del Luteziano, localizzati alla testata della valle. Tale substrato subisce una corrosione superficiale con dissoluzione dei carbonati ed accumulo locale di impurità argillose, silicate e ferruginose. Tale alterazione, particolarmente ben osservabile nei calcari del Luteziano nella zona di Monte Gouta porta, se evoluta, alla formazione di accumuli di sesquiossidi in fratture in cui il colore rossastro caratteristico è dovuto al residuo insolubile presente nel calcare di partenza.



Localmente si formano terreni di tipo rendizinitico: in ogni caso il substrato calcareo produce suoli poco evoluti pedologicamente e di modesto spessore.

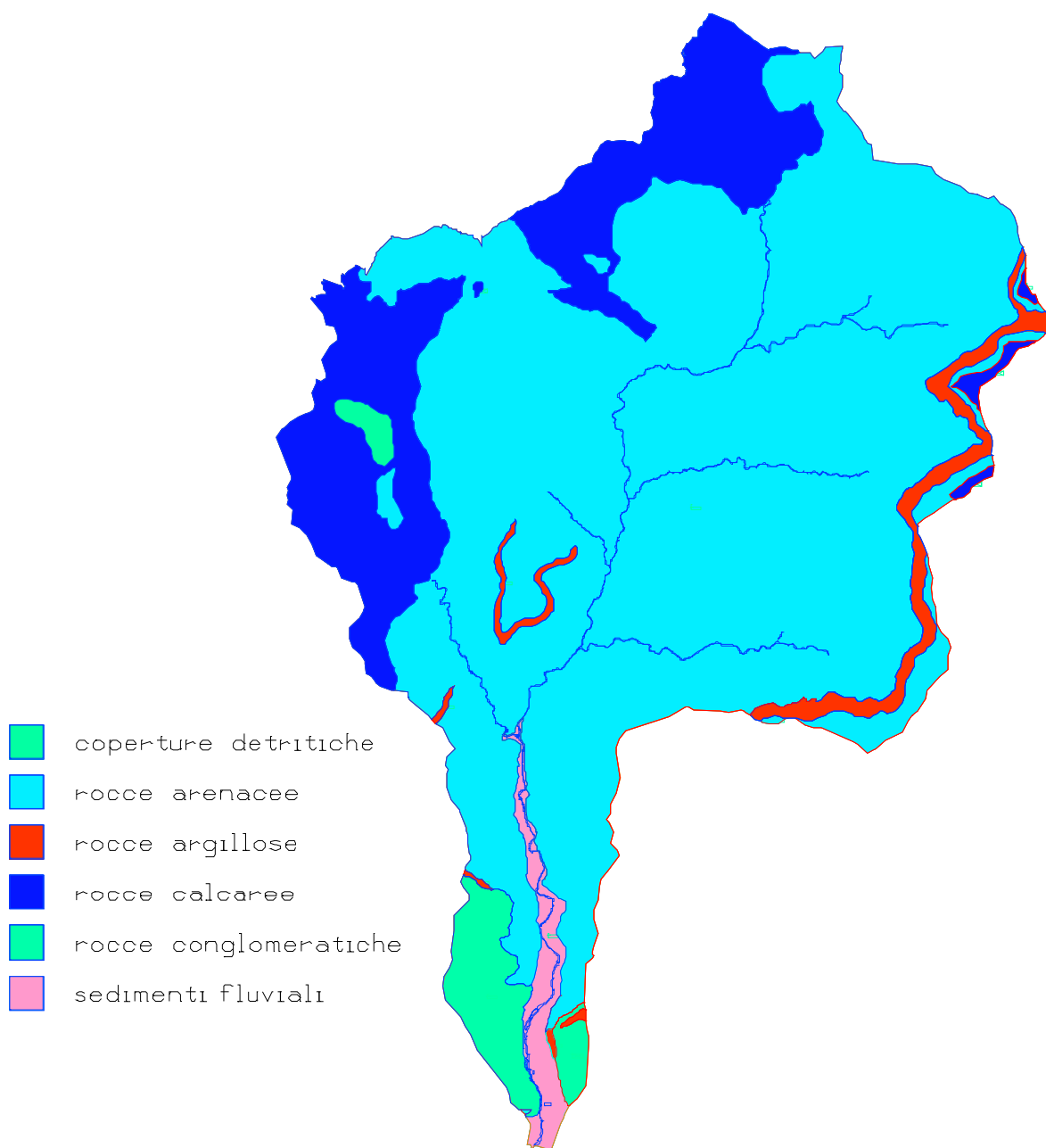


Figura 3.6 Carta della litologia superficiale



3.1.2.3 Copertura vegetale

Il bacino del Nervia presenta la peculiare caratteristica di avere quote variabili dai 0 metri sul mare agli oltre 2.000 e tutto ciò nel breve spazio di circa 20 chilometri in linea d'aria.

Per questo motivo la valle presenta una svariatissima gamma di caratteri e di zone fitoclimatiche, che vanno dal Lauretum al Picetum, anche se la combianzione della vicinanza del mare, delle quote e delle esposizioni originano un clima vario e complesso difficilmente riconducibile ai tipi correntemente classificati. In ogni caso, a parità delle altre condizioni, ad esposizioni diverse corrispondono microclimi diversi per cui nei versanti rivolti a sud anche ad altezze elevate si possono individuare i caratteri tipici di quote decisamente inferiori, mentre nei versanti rivolti a nord si riscontrano caratteristiche proprie di ambienti di media o alta montagna.

L'influenza marina determina infatti, anche a quote relativamente elevate, condizioni climatiche mediterranee con conseguente penetrazione all'interno di specie termofile quali il leccio, il pino marittimo, il pino d'Aleppo, le ginestre la lavanda ed il timo, mentre l'altezza sul mare e l'afflusso di masse d'aria continentale favoriscono la discesa a quote relativamente modeste di specie alpine quali il pino silvestre e l'abete bianco. L'innevamento, che solo nelle parti più elevate è abbastanza abbondante, protegge dai rigori invernali le specie più sensibili, mentre la permanenza della neve al suolo, che è notevolmente molto più breve rispetto a quella dei settori alpini continentali, favorisce l'anticipo della stagione vegetativa.

Nella Valle Nervia si possono riscontrare associazioni fitoclimatiche tipiche del piano mediterraneo, del piano collinare, del piano montano e del piano subalpino; piani che, per le peculiarità appena ricordate, sono strettamente interconnessi tra loro o addirittura a volte invertiti in virtù di particolari caratteristiche della stazione in esame.

a) Piano Mediterraneo

In questa zona è concentrata la maggior parte dei terreni sfruttati a scopi agricoli, gli uliveti ed i vigneti meno pregiati non sono più coltivati ed i muri a secco che sostengono le terrazze stanno crollando.

Il bosco è di frequente inframmezzato ai terreni agricoli ed ad esso in genere sono state riservate le zone più acclivi, le esposizioni più infelici, i terreni più superficiali ed ingrati o le zone più lontane dai centri abitati.

Vi sono anche molte zone che, essendo state abbandonate dagli agricoltori, si stanno



rivestendo di un manto arbustivo ed arboreo che può rappresentare un preludio allo sviluppo del bosco; tale ritorno del bosco è però reso problematico dalla frequenza degli incendi.

In tale zona il bosco è spesso costituito da sparsi pini isolati ove la rinnovazione, talora abbondante, è sempre in competizione col cespugliame infestante e compromessa dal fuoco. A causa della diminuzione o della scomparsa periodica della copertura erbacea ed arbustiva per via degli incendi, i terreni hanno subito estesamente e profondamente l'erosione ad opera del deflusso superficiale, che ne ha ridotto la profondità e la possibilità di ospitare vegetazione di tipo evoluto.

A causa degli incendi, soprattutto quelli ripetuti a distanza di pochi anni, si assiste ad una involuzione per cui una zona, in origine boscata a copertura pinea, si trasforma in zona boscata a copertura mediocre con gravi anomalie di composizione e strutture che evolvono poi in cespugliato o addirittura in incolto semisterile con substrato roccioso affiorante e privo o quasi di orizzonte umifero.

Specie caratteristiche del piano mediterraneo, partendo dal livello del mare e salendo sino a circa 800 - 900 m s.m.m., sono il pino d'Aleppo (limitatamente alla zone più calde), il pino marittimo, il leccio (che però si spinge oltre i 1.000 della Cima Manaira) e l'orniello con sottobosco arbustivo di rosmarino, mirto, erica, ginestra, cisti, timo e lavanda.

Alle quote più elevate, verso la zona di transizione nel piano collinare, si rinvencono anche formazioni consistenti di roverella, carpino e castagno; quest'ultimo ampiamente diffuso artificialmente in passato per suo interesse agrario e forestale.

Il degrado ambientale nelle zone classificabili come appartenenti al piano "mediterraneo" è da imputare a varie cause, quali l'incendio, l'abbandono dei terreni marginali anche a causa della parcelizzazione delle proprietà e la malattia che porta a morte il pino marittimo (*Matsucoccus feytaudi*).

b) Piano collinare

Il piano collinare è compreso approssimativamente tra la fascia altitudinale degli 800 ÷ 900 metri e quella dai 1.100 ÷ 1.200 metri s.m.m., è caratterizzato dai quarceti di roverella, dai boschi di castagno, carpino e nocciolo.

Nella Valle Nervia questo piano è alquanto mascherato sia perché l'intervento dell'uomo, soprattutto in passato, ha favorito alcune specie a discapito di altre sia per la plasticità di alcuni tipi di piante che, grazie ad esposizione idonee o a microclimi



particolari, salgono oltre la loro quota usuale (es. leccio e pino marittimo) o che discendono anche abbondantemente sotto la loro normale quota (es. il pino silvestre e l'abete bianco).

In questo piano si rinvenivano numerose aree in passato adibite a colture cerealicole ed ora adibite a pascolo, generalmente tali zone sono fortemente degradate.

Anche nelle zone del "piano collinare" il degrado maggiore è causato dall'incendio e dall'abbandono da parte dell'uomo dei terreni marginali, oltre che delle malattie (cancro e mal dell'inchiostro) del castagno.

c) Piano Montano

E' la zona a carattere fortemente forestale della Valle Nervia e, a seconda delle esposizioni, comprende la fascia altitudinale che varia dai 1.200 ai 1.800 metri s.m.m.

Ricadono in questo piano le zone ampiamente boscate dei monti Paganica, Giardino, Gouta, Corma e Ceppo. La copertura arborea, generalmente molto abbondante, è costituita principalmente dal pino silvestre, dall'abete bianco, dal faggio e dal larice. La specie predominante è comunque il pino silvestre che rinviene con frequenza anche nel sottostante piano collinare; il larice si trova essenzialmente nella zona della Tenarda su terreni "giovani" edificamente poco evoluti; le abetine più rimarchevoli sono quelle di Gouta e Testa d'Alpe; le faggete più consistenti sono quelle situate nord del lago della Tenarda e quelle dell'alto bacino dei rii Gordale e Brugheo che scendono dal Monte Ceppo.

Le zone boscate ricadenti nel "piano montano" sono generalmente in buone condizioni fisico-vegetative e come principali avversità si possono citare l'incendio, la galaverna (Testa d'Alpe), la processionaria del pino e le fluttuazioni periodiche di vari insetti defolianti che però non creano eccessivi problemi.

Un serio problema è rappresentato invece dal fuoco nelle pinete di pino silvestre che, in considerazione delle zone in cui vegeta, predilige le stazioni a clima continentale, assolate e secche, è maggiormente esposto rispetto alle altre essenze; inoltre il pino silvestre è molto sensibile al calore dell'incendio e le piante attaccate hanno molte probabilità di perire.

d) Piano subalpino

Nella Valle Nervia il piano subalpino è circoscritto ai monti Pietravecchia e Toraggio, quindi alla fascia altitudinale che parte da circa 1.800 metri s.m.m. e raggiunge i 2.038



metri di quota del Pietravecchia. La vegetazione arborea è limitata a sparuti esemplari di larice (ad esclusione di una sottile lingua di bosco situata sulla parte alta di Valle Tane) che vegetano abbarbicati alle strapiombanti pareti rocciose. Questo piano è definito subalpino in quanto la mancanza di copertura vegetale completa non è dovuta tanto a fattori altitudinali o climatici, quanto all'asprezza dell'ambiente roccioso, alla mancanza di terra dovuta alla pendenza e agli sfaciumi sempre in movimento.

E' da rimarcare comunque che in questa zona è presente una vegetazione erbacea impreziosita da numerosi endemismi e non mancano mescolate a piante di tipo alpino, piante mediterranee quali il timo e la lavanda.

3.1.3 SISTEMA ANTROPICO

3.1.3.1 Sviluppo dell'assetto territoriale

L'occupazione della Val Nervia da parte delle antiche popolazioni liguri è testimoniata dall'esistenza dei "castellari": insediamenti permanenti localizzati sui crinali. Importanti ritrovamenti sono stati effettuati, ad esempio, nei pressi di Monte Bignone e Monte Caggio; inoltre la localizzazione di molti centri storici medioevali indicherebbe l'esistenza di un insediamento arcaico precedente (Castelvittorio, Apricale, Perinaldo, Baiardo). Strabone (63 a.c. - 19 d.c.) nel suo trattato di geografia, parla dei Liguri Embriantes come abitanti di Baiardo. Anche le vie arcaiche di comunicazione erano principalmente localizzate sui percorsi di crinale.

Nei primi secoli dell'occupazione romana si ha una lunga resistenza alla colonizzazione con organizzazioni autonome delle tribù liguri dell'interno, con lo sviluppo dell'Impero si giungerà ad un superamento di tale situazione, con il definitivo assoggettamento dell'area in esame alla potenza romana.



Particolarmente interessante risulta in quest'arco di tempo lo sviluppo di Ventimiglia. L'oppidum dei Liguri Intemeli (Albium Intemelium) occupava le ultime propaggini della ripida collina sulla destra ideografica della foce del Torrente Nervia.

Nel 180 a.c. tale zona entra nell'orbita romana con l'insediamento di un castrum con presidio. L'insediamento crebbe di importanza, come testimoniano gli scavi archeologici iniziati già nella seconda metà del secolo scorso ad opera di Girolamo Rossi, fino a costituire la sede (Albintimilium) di uno dei principali municipi della Riviera di Ponente comprendente, con altri territori, l'intera Val Nervia.

La città era dotata di un acquedotto che captava l'acqua del Rio Seborrino, sul pendio della Colla Sgarba, a 3 Km dalla "città nervina" e la adduceva ad essa costeggiando il fianco destro del torrente Nervia. E' probabile, inoltre, che la stessa foce del torrente servisse da porto: il mare era molto più vicino di oggi alla città e ne lambiva quasi le mura meridionali.

La permanenza romana porterà alla realizzazione di una via costiera "Via Julia Augusta" e ad una di fondo valle, come direttrice di penetrazione dalla città nervina verso l'interno. In seguito alle invasioni barbariche (V sec. d.C.) si ebbe l'abbandono della città alle foci del Nervia e l'impianto del nuovo nucleo medioevale di Ventimiglia nell'adiacente bacino del Roya.

La popolazione cercò rifugi più sicuri nell'interno, con la colonizzazione stabile delle altre valli e dei territori della montagna. Nella Val Nervia sembra che si sia sviluppata una discreta attività agricola in confronto della maggiore povertà delle valli adiacenti. L'estensione territoriale del municipio romano si perpetuò nel comitato carolingio, da cui derivarono i possedimenti feudali dei Conti di Ventimiglia. Lo smembramento della contea nel 1261 estromette i Conti di Ventimiglia dalla Val Nervia e assegna alla Signoria dei Marchesi Doria il territorio di Dolceacqua, Isolabona, Apricale e Perinaldo, alla Repubblica di Genova Castelvittorio, Baiardo e Camporosso, alla Provenza l'area di Pigna, ceduta ai Savoia nel 1388. Rocchetta Nervina entrerà definitivamente nei possedimenti dei Doria solo nel 1560 dopo una discontinua presenza savoiarda.

Fasi Alterne di penetrazione francese da Ovest, piemontese da Nord e Genovese da Est provocheranno successive variazioni di tali confini e giurisdizioni. In particolare il Marchesato dei Doria rimarrà nell'orbita genovese fino al 1634, anno dell'occupazione sabauda, con conseguente passaggio nell'area piemontese. Camporosso, poi, entrerà a far parte nel 1686 della "Magnifica Comunità dei 7 luoghi", comprendente altri piccoli centri delle valli adiacenti ad Est.



Lo stabilirsi nei secoli di questa rete di confini antigeografici ha portato alla formazione di vie di comunicazione particolari, spesso con direzioni contrastanti con le direttrici orografiche delle valli. La prima stesura cartografica organica ed esauriente dei principali percorsi interessanti la Val Nervia e il resto del Ponente si deve a Panfilio Vinzoni nel 1752, conservata al Museo Bicknell di Bordighera.

La creazione della Repubblica Ligure nel 1797, l'annessione al Regno di Sardegna nel 1814 e al Regno d'Italia nel 1861 rappresentano le tappe della definitiva unificazione sotto un'unica giurisdizione delle territorialità politiche della Val Nervia. Nel 1878 viene costruita la carrozzabile fino a Pigna che sostituisce la vecchia mulattiera sulla sponda destra del Torrente. Successivamente vennero costruite le rotabili militari che portano a particolari posizioni strategiche (Passo dell'Arpetta, Monte Alto, Monte Magi, etc.) con vistose opere di fortificazione.

In quest'ultimo secolo lo spopolamento montano, l'abbandono delle attività agricole, la ricerca di migliori condizioni economiche e sociali di vita nei settori produttivi, in Italia e, particolare in questa zona, nella vicina Francia, hanno profondamente inciso sulla distribuzione demografica locale.

Tale tendenza si è parzialmente arrestata negli ultimi anni per il ritorno nelle località montane di anziani ed anche di giovani, costretti dalla penuria di abitazioni sulla costa.



3.1.3.2 Situazione socio-economica

Dall'esame della tabella 3.3 appare chiaramente come la popolazione residente nel bacino del Torrente Nervia alla data del censimento del 1991, fosse concentrata per la massima parte nella "bassa valle". Infatti degli 11.599 residenti ben il 64% (7396 persone) risiedevano nei comuni di Camporosso, San Biagio della Cima e Dolceacqua.

Questa così marcata distribuzione spaziale della popolazione risulta ancora più evidente dall'esame della mappa di Figura 3.7: la densità della popolazione passa dai 15-25 abitanti per chilometro quadrato dei comuni dell'alta valle fino agli oltre 250 di Camporosso.

comune	pop. Residente	densità (ab/kmq)
APRICALE	558	28
BAIARDO	364	15
CAMPOROSSO	4642	259
CASTEL VITTORIO	458	18
DOLCEACQUA	1693	82
ISOLABONA	636	53
PERINALDO	856	42
PIGNA	1055	20
ROCCHETTA NERVINA	276	18
SAN BIAGIO DELLA CIMA	1061	239
TOTALE	11599	54

Tabella 3.3 Popolazione residente e densità al censimento del 1991

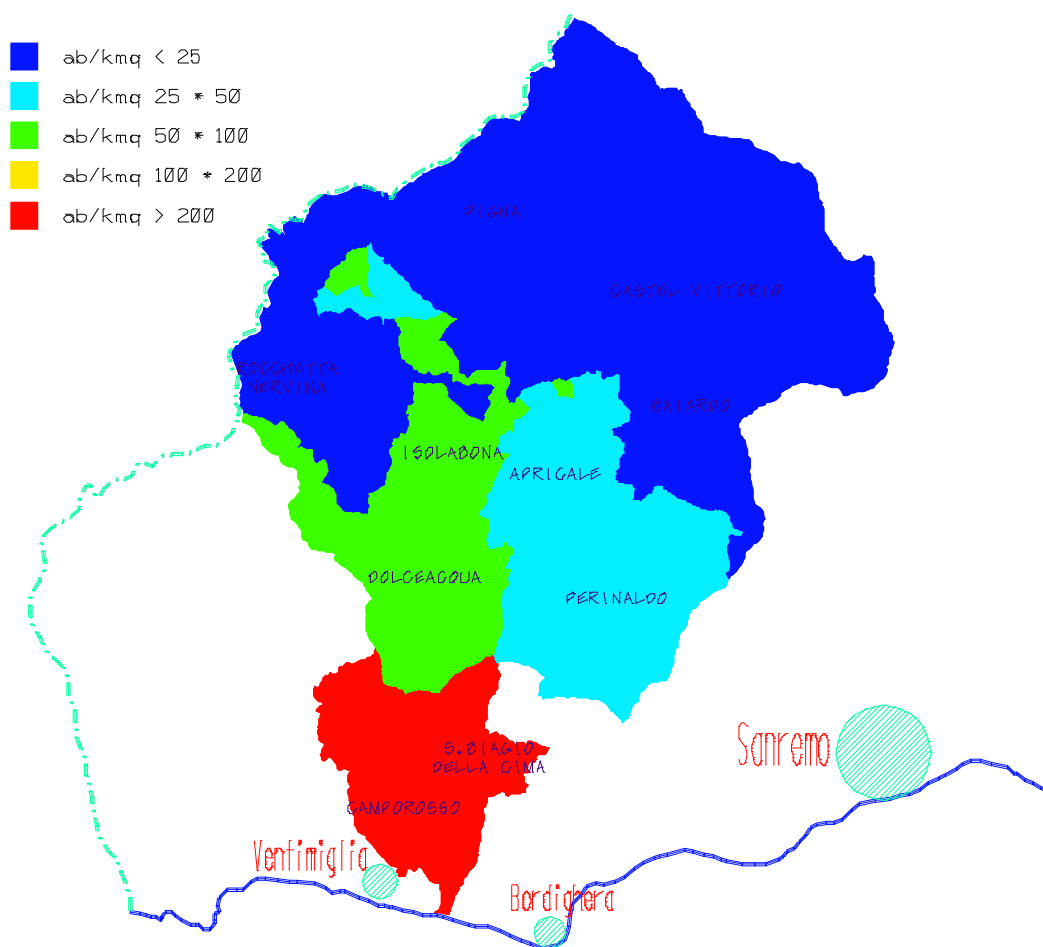


Figura 3.7 Densità della popolazione in base ai dati del censimento 91

Per cercare di individuare come la situazione si è evoluta nel corso degli ultimi decenni e ottenere quindi un quadro più approfondito della dinamica della popolazione all'interno del bacino si sono analizzati i saldi migratori i naturali, desunti dai dati comunali degli ultimi quaranta anni.

Nel 1959 la popolazione residente nel bacino era di 11998 abitanti ma la ripartizione sul territorio era assai diversa: il 43% degli abitanti era ancora residente nell'alta valle, e nel comune di Camporosso ne risiedeva solo il 20%.

Guardando invece i saldi migratori e naturali (Figura 3.8), già in quegli anni appariva chiaro ciò che avrebbe caratterizzato i successivi 20-30 anni. Saldi negativi per l'alta valle (fatta eccezione per il Comune di Pigna che ospitava in quegli anni i cittadini italiani provenienti dalla Libia) e positivi per i comuni costieri.

Comune	Pop. residente		Comune	Pop. residente	
Apricale	948	7.9%	Pigna	1846	15.4%
Baiardo	742	6.2%	Rocchetta Nervina	472	3.9%
Camporosso	2344	19.5%	San Biagio d.C.	795	6.6%
Castel Vittorio	959	8.0%	alta valle	5219	43.5%
Dolceacqua	1935	16.1%	bassa valle *	4435	37.0%
Isolabona	757	6.3%	val Nervia	11998	100.0%
Perinaldo	1200	10.0%			
* escluso Camporosso					

Tabella 3.4 Popolazione residente al 31/12/1959

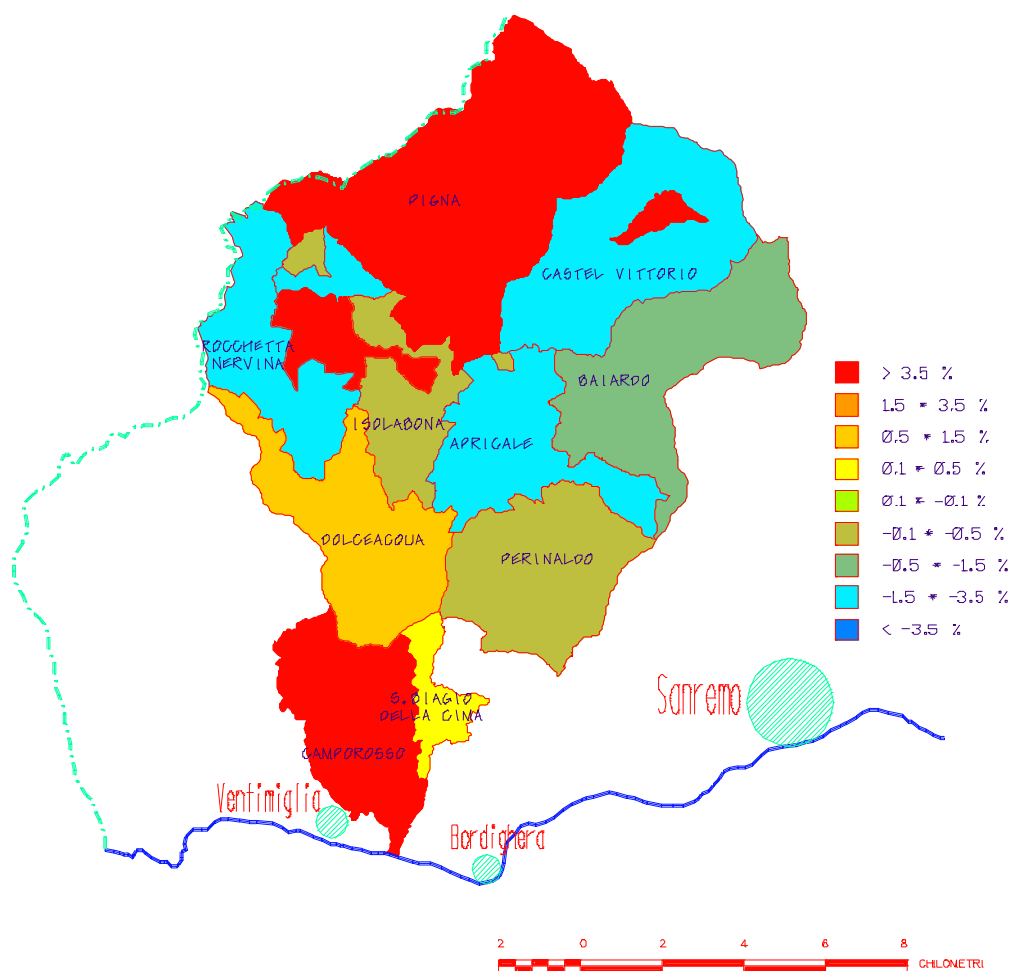


Figura 3.8 Variazione percentuale della popolazione periodo 59-64



In soli otto anni il comune di Camporosso incrementa la propria popolazione di quasi il 50%, assumendo un ruolo sempre più importante all'interno della valle. Gli altri comuni tendono a calare leggermente ma nel complesso, grazie al ruolo ancora importante del comune di Pigna la popolazione resta invariata. Nel 1967 il forte incremento nei comuni costieri accenna già a diminuire, mentre resta negativo, nel complesso il saldo della popolazione dei comuni dell'entroterra.

Comune	Pop. residente		Comune	Pop. residente	
Apricale	774	5.9%	Pigna	2281	17.5%
Baiardo	667	5.1%	Rocchetta Nervina	400	3.1%
Camporosso	3483	26.7%	San Biagio d.C.	791	6.1%
Castel Vittorio	799	6.1%	alta valle	5325	40.9%
Dolceacqua	1949	15.0%	bassa valle *	4218	32.4%
Isolabona	704	5.4%	val Nervia	13026	100.0%
Perinaldo	1178	9.0%			
* escluso Camporosso					

Tabella 3.5 Popolazione residente al 31/12/1967

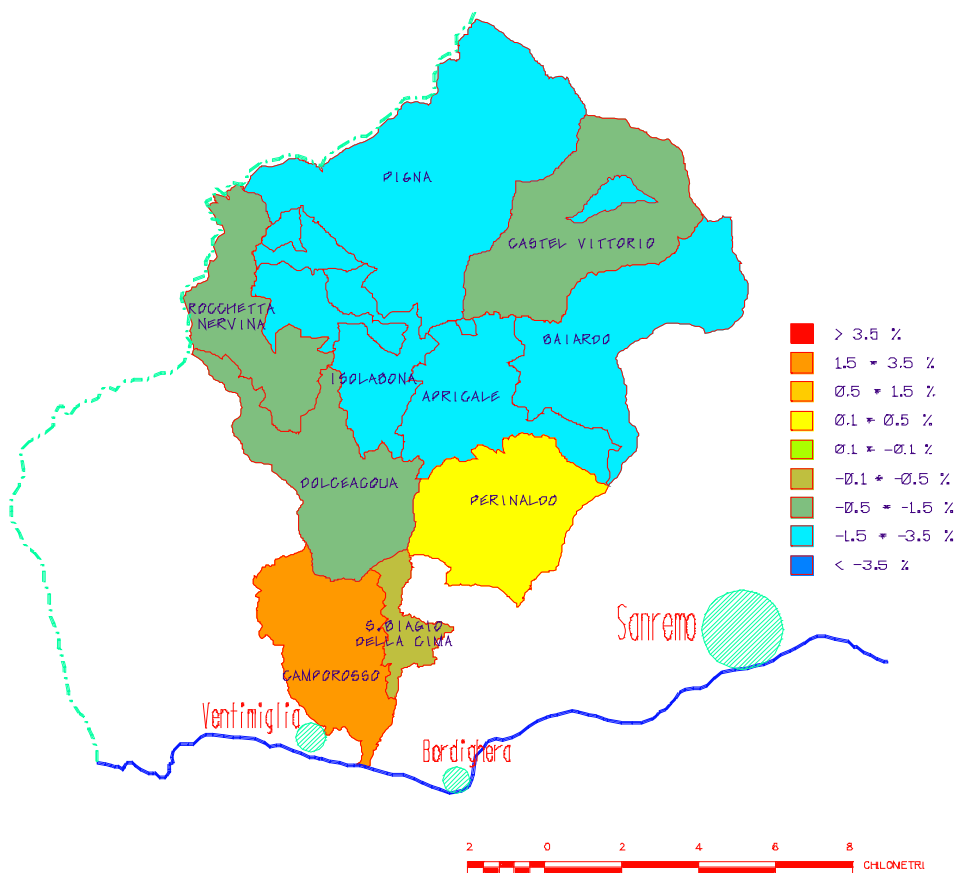


Figura 3.9 Variazione percentuale della popolazione nel periodo 65-67

Negli anni che vanno dal 1967 al 1977 I comuni dell'alta valle perdono 1300 abitanti, ormai il solo comune di Camporosso supera i comuni dell'entroterra e da solo raccoglie il 34% dei residenti. I comuni della fascia intermedi registrano un calo più contenuto, con l'eccezione di San Biagio della Cima con un incremento di circa il 10%.

Comune	Pop. residente		Comune	Pop. residente	
Apricale	615	5.1%	Pigna	1594	13.1%
Baiardo	495	4.1%	Rocchetta Nervina	308	2.5%
Camporosso	4235	34.8%	San Biagio d.C.	811	6.7%
Castel Vittorio	626	5.1%	alta valle	4023	33.1%
Dolceacqua	1839	15.1%	bassa valle *	3905	32.1%
Isolabona	640	5.3%	val Nervia	12163	100.0%
Perinaldo	1000	8.2%			

* escluso Camporosso

Tabella 3.6 Popolazione residente al 31/12/1977



Figura 3.10 Variazione percentuale della popolazione nel periodo 75-77



Nel 1987 la situazione della distribuzione della popolazione nella Val Nervia appare sempre più disomogenea, si è accentuata la marginalità delle zone dell'alta valle, nella quale i residenti sono ulteriormente calati fino a rappresentare poco più di un quarto della popolazione totale.

Comune	Pop. residente		Comune	Pop. residente	
Apricale	463	4.0%	Pigna	1140	9.8%
Baiardo	381	3.3%	Rocchetta Nervina	278	2.4%
Camporosso	4550	38.9%	San Biagio d.C.	951	8.1%
Castel Vittorio	496	4.2%	alta valle	3176	27.2%
Dolceacqua	1914	16.4%	bassa valle *	3959	33.9%
Isolabona	631	5.4%	val Nervia	11685	100.0%
Perinaldo	881	7.5%			
* escluso Camporosso					

Tabella 3.7 Popolazione residente al 31/12/1987



Figura 3.11 Variazione percentuale della popolazione nel 1987

La popolazione residente nel 1996, ultimi dati disponibili, risultava distribuita come in tabella 3.8. occorre rilevare che in questo ultimo decennio i comuni della bassa valle hanno incrementato il loro peso all'interno del bacino passando dal 33.9% al 35.3%.

Comune	Pop. residente		Comune	Pop. residente	
Apricale	580	4.8%	Pigna	1037	8.5%
Baiardo	351	2.9%	Rocchetta Nervina	296	2.4%
Camporosso	4925	40.5%	San Biagio d.C.	1164	9.6%
Castel Vittorio	426	3.5%	alta valle	2952	24.3%
Dolceacqua	1876	15.4%	bassa valle *	4289	35.3%
Isolabona	669	5.5%	val Nervia	12166	100.0%
Perinaldo	842	6.9%			
* escluso Camporosso					

Tabella 3.8 popolazione residente al 31/12/1996



Figura 3.12 Variazione percentuale della popolazione nel 1996



Osservando nell'insieme i saldi di popolazione degli ultimi trenta anni dei comuni dell'alta Val Nervia è subito evidente che il calo più consistente si è verificato negli anni '70 mentre. Questo andamento negativo ha dimostrato un leggero rallentamento negli ultimi dieci anni

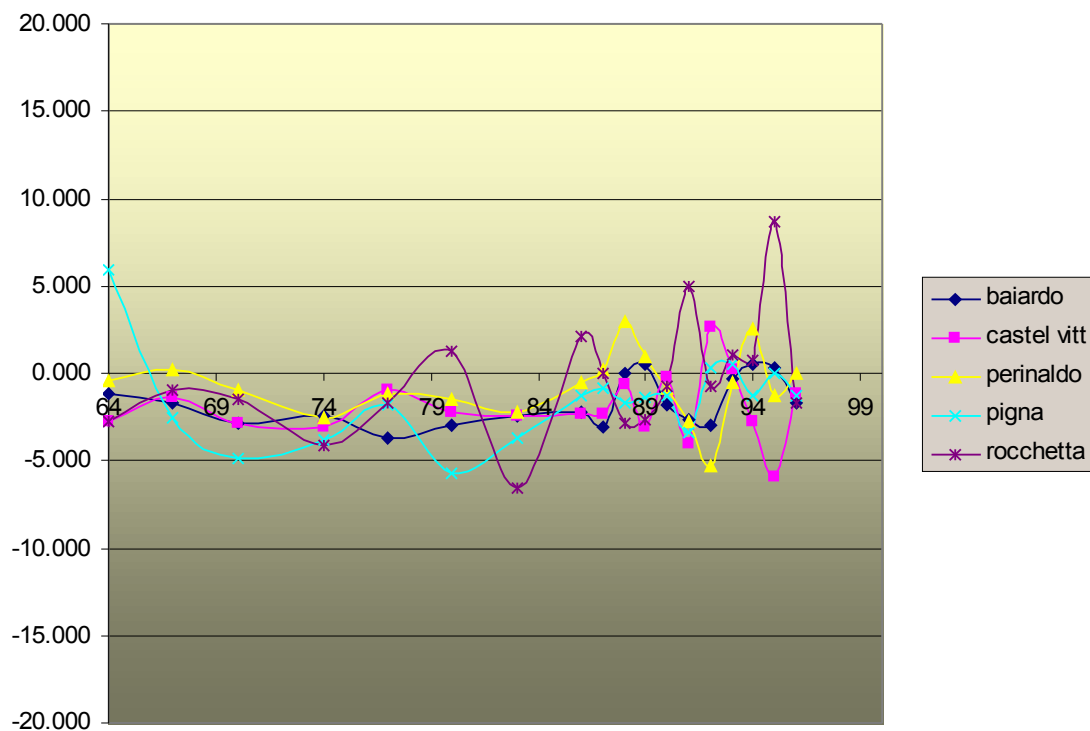


Figura 3.13 Saldo complessivo della popolazione per i comuni dell'alta valle Nervia

Scomponendo questi dati di variazione complessiva fra saldo naturale e migratorio si nota che il saldo naturale è decisamente negativo per tutti i comuni, il saldo migratorio, spesso positivo, è insufficiente a colmare il deficit naturale. Fa eccezione Rocchetta N. (il comune più facilmente accessibile dalla costa) che dal 1991 conosce una fase di leggera espansione.

I comuni della bassa Val Nervia, ad eccezione di San Biagio della Cima, fino alla metà degli anni ottanta hanno registrato un calo costante della popolazione, nell'ultimo decennio l'eccessiva pressione sui comuni costieri ha spinto la popolazione verso le zone dell'immediato entroterra. Si noti che le fluttuazioni sono dovute all'esiguo numero di abitanti di alcuni comuni, per cui variazioni anche modeste in termini assoluti generano variazioni percentuali rilevanti. Scomponendo questi dati di variazione complessiva in saldo migratorio e naturale come per i comuni dell'alta valle anche in questo caso il saldo naturale è quasi sempre negativo; tuttavia il saldo migratorio riesce a colmare il deficit naturale. Soprattutto in Camporosso (unico comune costiero e centro principale della valle) e in San Biagio della Cima (immediatamente a ridosso della costa). Come già evidenziato la popolazione si sta spostando verso l'immediato entroterra, questa dinamica dall'inizio degli anni '90 sta interessando i comuni di Dolceacqua e Isolabona, Apricale (il comune più decentrato) ne ha invece risentito un po' in ritardo.

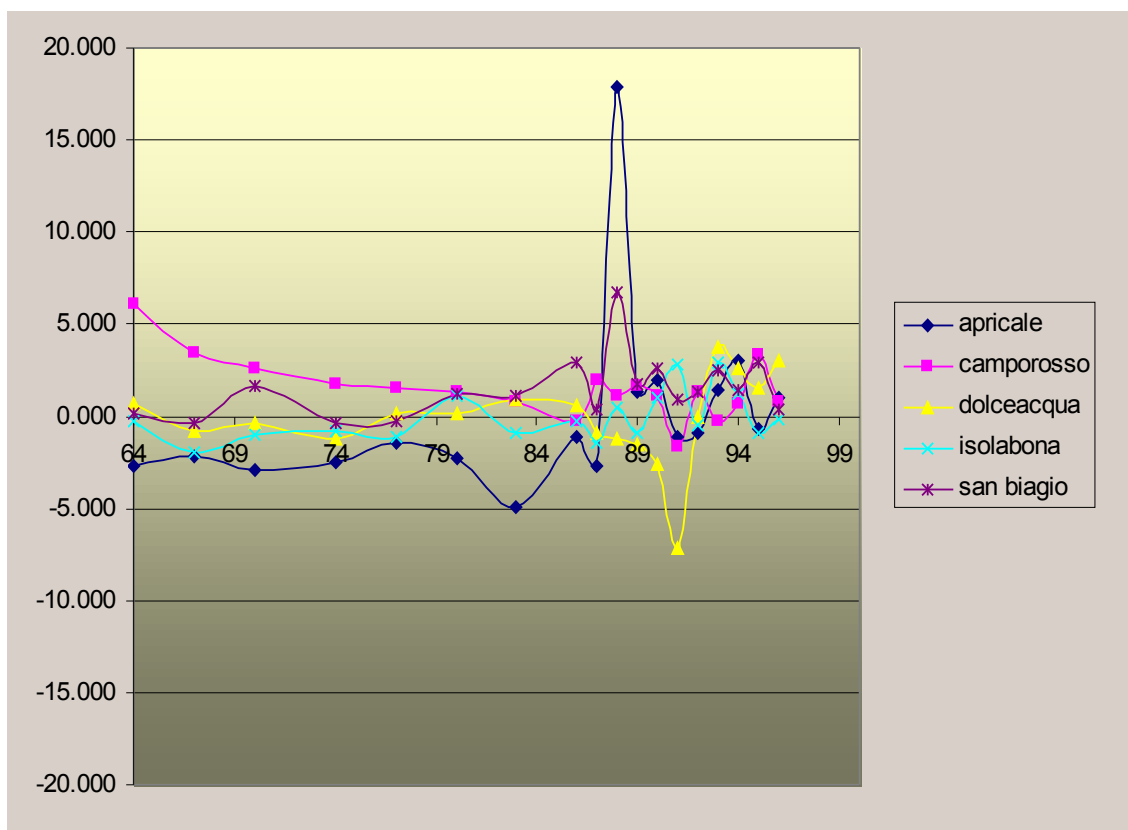


Figura 3.14 Saldo complessivo della popolazione per i comuni della bassa valle Nervia



La situazione occupazionale all'interno del bacino è caratterizzata da forti tassi di pendolarismo verso i comuni costieri più importanti (Ventimiglia, Bordighera e Sanremo).

L'incremento della popolazione registrato nei comuni dell'immediato entroterra è dovuto essenzialmente a motivi di convenienza economica e non alla creazione di nuove opportunità lavorative.

In Dolceacqua il pendolarismo è minore in quanto sede di numerose istituzioni (Comunità montana, scuole medie, museo, Corpo forestale, ...) che impiegano circa il 20% degli addetti delle unità locali.

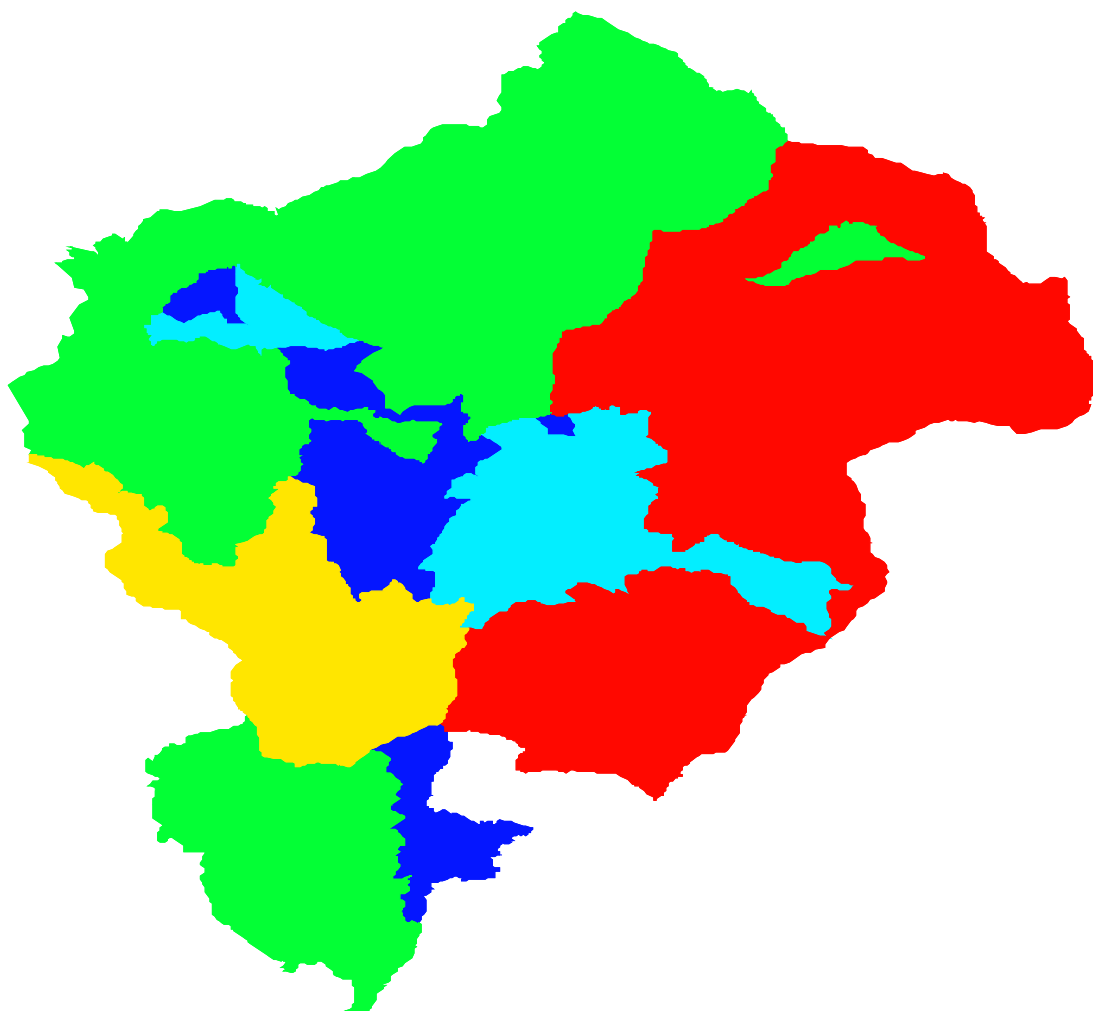


Figura 3.15 Tasso di pendolarismo nel 1991

Come indicatore sintetico delle dinamiche della popolazione all'interno del bacino si può assumere l'indice di vecchiaia (rapporto fra la popolazione residente al di sopra dei 65 anni e quella al di sotto dei 15 anni).

I comuni montani più difficilmente accessibili dalla costa non subiscono il flusso migratorio di chi cerca una alternativa abitativa al di fuori dei comuni rivieraschi ma che ha comunque bisogno di recarsi quotidianamente al lavoro sulla costa (Castel Vittorio, Baiardo e Perinaldo hanno un tasso di pendolarismo inferiore al 20%).

Senza questi "nuovi cittadini" il bassissimo tasso di natalità non può che condurre ad un invecchiamento della popolazione residente.

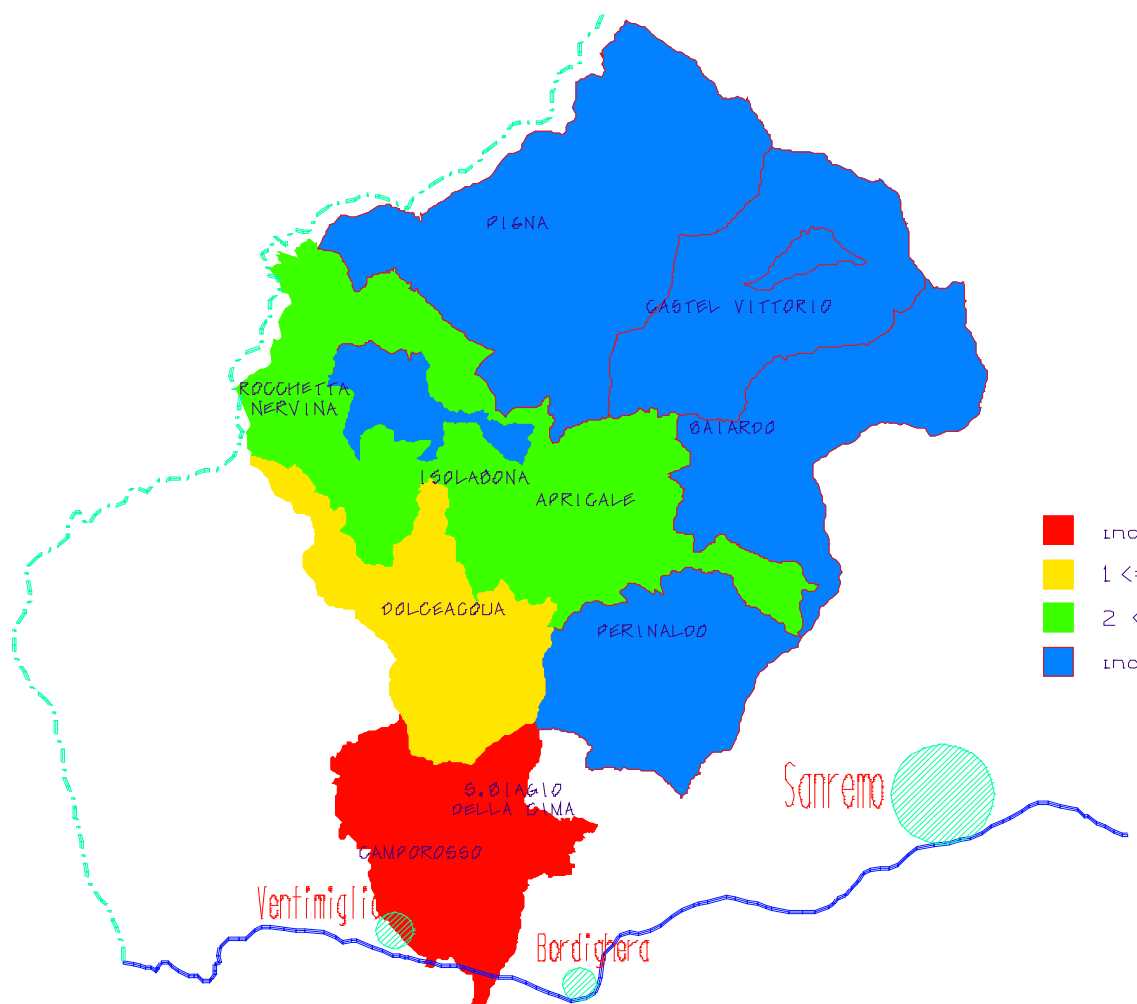


Figura 3.16 Indice di vecchiaia in base ai dati del censimento del 1991



3.1.3.3 Uso del suolo

La carta dell'uso del suolo riportata in Figura 3.17 risulta essere uno strumento molto significativo sia per l'analisi territoriale che per quella idrologica.

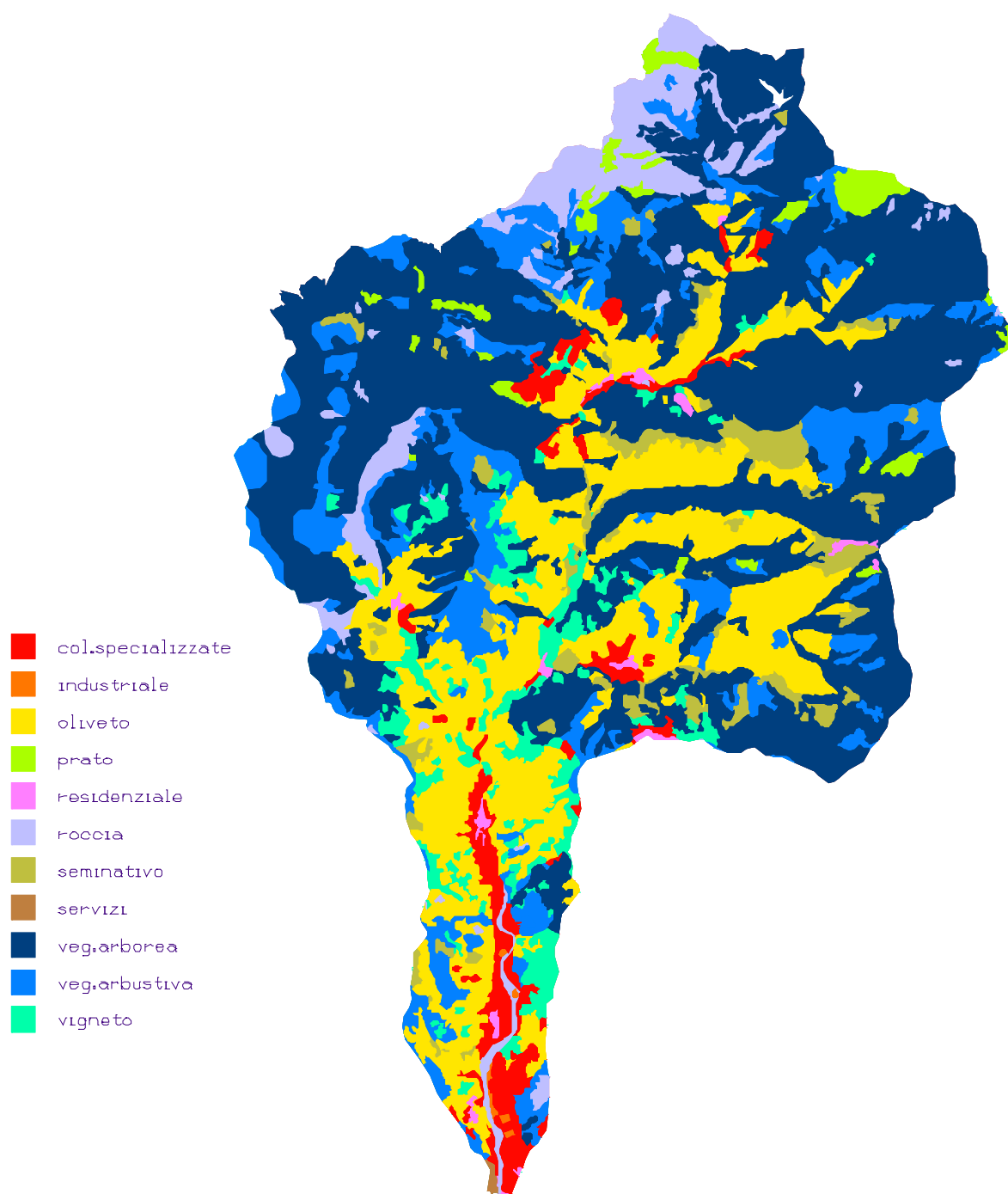


Figura 3.17 Carta dell'uso del suolo. Dai Tipi 1:25000 della Regione Liguria



L'economia dell'estremo ponente ligure è fondata essenzialmente sul turismo e sull'agricoltura. Per la particolare conformazione del bacino, che presenta un fronte mare di soli 400 metri la principale fonte di reddito per gli abitanti della Val Nervia è l'agricoltura che impiega circa la metà della popolazione attiva.

Le attività agricole ad alto reddito, floricoltura e viticoltura (quasi la totalità dei vigneti della Val Nervia è vocata alla produzione di vini a denominazione di origine controllata), sono concentrate tutte nella bassa valle, la coltivazione dell'olivo, che dopo anni di abbandono sta lentamente rifiorendo, è invece più diffusa sul territorio.

Si deve far rilevare anche la quasi totale assenza di aree industriali e adibite a servizi.

Le zone classificate come "seminativi" sono in realtà vecchi campi abbandonati ormai da parecchi decenni e che via via sono invasi dagli arbusti.

3.1.3.4 Le alluvioni

Per completare il quadro informativo relativo al bacino del torrente Nervia, in particolare per la predisposizione di un sistema di prevenzione del rischio idraulico, è necessaria una breve analisi degli eventi alluvionali conosciuti per valutare le aree più frequentemente vulnerate e quindi in prospettiva più vulnerabili.

I dati a disposizione hanno permesso di ricostruire, con sufficiente precisione la cronologia degli eventi alluvionali avvenuti nel bacino del Torrente Nervia a partire dalla prima metà del XVIII secolo.

La prima alluvione di cui è stato possibile avere notizia risale al 18 Ottobre 1738. In tale occasione, come riportato da Girolamo Rossi nella sua "Storia del Marchesato di Dolceacqua" si ebbe un generale allagamento delle campagne.

Maggiori particolari si hanno per l'evento alluvionale del 2 Ottobre 1777 rimasto nella memoria popolare con il nome di "Fiumara degli Angeli Custodi". In tale occasione da Isolabona a Ventimiglia si ebbero scoscendimenti di terra, scomparsa di coltivazioni, rovine di edifici ed annegamento di animali.

In particolare ad Isolabona furono travolti mulini e frantoi: le acque del Nervia, alzatesi più di quelle del Merdanzo, arrivarono fino al primo gradino sotto le logge. Tra gli altri danni si ricorda la distruzione del ponte sul torrente Barbaria all'imbocco col torrente di Dolceacqua e l'inondazione della parrocchia con acque fin sopra la Mensa della Cappella del Rosario (circa 4 m di altezza).



A Camporosso si ebbe la rovina dei canali, l'allagamento della piazza e della parrocchia di San Marco e l'inondazione completa della zona agricola de "La Braje" alla foce del Nervia.

Un'importante ed esauriente cartografia del basso corso del torrente, risalente alla prima metà di XIX secolo, è conservata nel municipio di Camporosso. Tale carta, in scala 1:1.500. porta l'intestazione "Pianta di una parte del territorio del comune di Camporosso la quale comprende il corso della Nervia partendo dal limite di Dolceacqua sino al mare colle terre piane adacquabili ed altre esistenti sulle due sponde".

Il rilevamento, iniziato nel 1829 e terminato nel 1831 dà una chiara immagine del corso del Nervia in quel periodo, in gran parte molto differente dall'attuale. Mediante tale mappa è possibile ricostruire l'alveo relitto del torrente.

Altre notizie, più scarse e meno quantificabili, sul corso del torrente nella seconda metà del XIX secolo si possono ritrovare in un manoscritto di Don Francesco Rossi terminato nel 1892 e recentemente pubblicato a cura del comune di Camporosso sotto il titolo "Il Comune di Camporosso - Memorie storiche ed etnografiche".

Da tale scritto si apprende che in quel periodo il Nervia distava circa 250 m dalla piazza maggiore di Camporosso ed aveva circa 500 m di larghezza (tale misura deve essere probabilmente riferita alla dimensione trasversale dell'intera piana alluvionale). Tenendo conto della loro approssimazione, queste misure non si differenziano di molto dalle attuali. Da un punto di vista economico il Nervia forniva in quel periodo l'energia motrice a diversi opifici (segheria per legnami, cartiera e segheria per pietre litografiche a Dolceacqua) oltre a vari molini e frantoi. Altre lacunose ed imprecise notizie si sono rinvenute su alluvioni nel 1890 e 1896.

Una descrizione molto precisa e particolareggiata si ha invece per l'evento alluvionale del 1910 nella relazione del Colonnello Francesco Gibelli (Dicembre 1912) il quale si fa portavoce, presso le autorità governative, dei bisogni della popolazione di Camporosso, immiserita dalle disastrose inondazioni.

Nello scritto si osserva come il paese fosse esposto facilmente alla furia delle acque, essendo "come in una buca" rispetto al letto rialzato del torrente. Viene tra l'altro sottolineato un particolare curioso: alcuni avanzi di opere di protezione si trovavano allora in mezzo al corso del torrente, cosicché non si sapeva bene se i terreni che avevano difeso appartenessero alla sponda destra o a quella sinistra.



In una situazione già così "predisposta" alla rovina bastò una piena non straordinaria, causata da piogge verificatesi da Isolabona al mare, per provocare ingentissimi danni. Il maggior danno fu portato nuovamente alla regione Braje e ai piani di Nervia. Poco più a valle di questa zona l'acqua si raccolse in un largo braccio fluviale che, non confluendo più nel corso principale del torrente, si aprì un altro varco per due vie. Da un lato andò ad unirsi addirittura con il torrente Vallecrosia, posto ad Est, dall'altro, passando sotto la stazione di Vallecrosia, confluì direttamente in mare.

Nell'area della "Piazza d'Armi" si era formato un vero e proprio lago, con l'acqua che aveva raggiunto l'altezza di un metro sulla strada nazionale. Altri ingenti danni a Camporosso furono causati dal torrente Cantarana, affluente di destra del Nervia.

Negli anni precedenti, il rio in questione aveva trasportato a valle un'ingente quantità di materiale grossolano fino a scorrere in un alveo rilevato. Il ponte sulla strada provinciale, all'ingresso di Camporosso, alto una volta più di tre metri sull'alveo era allora ostruito. L'acqua in piena passava sul ponte e si riversava nel Corso Vittorio Emanuele.

Tra le cause dell'alluvione vengono sottolineati in termini d'incidenza negativa: i due ponti, troppo stretti e troppo vicini, della ferrovia e della strada nazionale, posti alla foce del Nervia; il disboscamento selvaggio dell'alta valle; l'insufficienza, causa il sopraelevamento del letto, delle difese spondali del Nervia. Per rimediare a quest'ultimo problema, veniva proposta una rettificazione ed arginatura del torrente per un tratto di 8 Km. L'arginatura del Nervia venne eseguita per il solo tratto da Camporosso alla foce, nel secondo dopoguerra. Nel 1948 si procedette ad un primo lotto con una spesa ripartita in due tempi: rispettivamente di 29 e 8 milioni. Il lavoro fu completato nel 1954 con un secondo lotto di 60 milioni.

L'ultima alluvione disastrosa si ebbe il 4. 11. 1966, con danni diffusi su tutta l'area del bacino. Procedendo da monte a valle, si ebbero frane e smottamenti in diversi punti sulle provinciali per Buggio, Rocchetta Nervina, Castelvittorio e sulla Apricale-Baiardo.

In particolare a Rocchetta Nervina si ebbe il crollo del ponte in pietra nel rio d'Oppia, inoltre il ponte a monte dell'abitato risultava al limite di portata del torrente.

A Isolabona furono travolte tre passerelle, due sul Nervia ed una sul Merdanzo, e crollò il ponticello sul Rio Rossi. Ad Apricale, secondo racconti di abitanti del luogo, le acque passavano sui ponti. Maggiori danni si ebbero a Dolceacqua, con il crollo del ponte nuovo e il conseguente allagamento della piazza: nella Parrocchia l'acqua raggiungeva l'altezza di 1 metro.

Altri danni subirono alcuni argini in gabbioni sulla sponda destra. Si rese necessario, oltre al loro rifacimento, la costruzione di un argine in calcestruzzo in sponda sinistra tra i due ponti, la



costruzione di due soglie, sotto il ponte "romano" e sotto il ponte nuovo, la ricostruzione del ponte nuovo, la pavimentazione del Rio Peitavino per un tratto di 500 m, la ricostruzione di un muro a valle del cimitero crollato per effetto del fiume. A Camporosso infine si ebbero vari allagamenti delle campagne ed asportazione di una passerella il località Cian de Cà.

3.2 Simulazioni

Il quadro che emerge da quanto riportato nel precedente paragrafo, indica chiaramente che il tratto di fiume che attraversa il comune di Camporosso è quello che in passato ha subito i maggiori danni. Inoltre questo tratto attraversa la zona più intensamente abitata dell'intera valle e anche quando scorre in piena campagna, a causa del particolare tipo di coltura, un'eventuale esondazione arrecherebbe danni economici ingentissimi con gravi ripercussioni per tutto il bacino.

Per questi motivi è stata effettuata una simulazione di un evento di piena centenario che ha preso in considerazione un tratto di asta fluviale di circa 6 km che va dalla foce fino a monte dell'abitato di Camporosso.

In questo paragrafo verrà illustrata la procedura seguita per la verifica idraulica.

3.2.1 LA CURVA DI PORTATA

Per ottenere la portata di progetto necessaria per la verifica idraulica sono stati analizzati innanzitutto i dati di pioggia.

All'interno del bacino esistono quattro stazioni di misura dotate di pluviografo, Ventimiglia, Pigna, Valle Tane e Colle Melosa. L'elaborazione statistica delle misurazioni degli eventi estremi di durata 1, 3, 6 e 24 ore consecutive ha fornito, per ciascuna stazione la curva di possibilità pluviometrica: $h=at^n$; dove h è l'altezza di pioggia, t il tempo di pioggia ed a e n due



coefficienti, l'uno dipendente dal tempo di ritorno e l'altro adimensionale. Per il tempo di ritorno di progetto (100 anni) si sono ottenuti i seguenti valori:

Stazione	a [mm*ore ⁻ⁿ]	n
Ventimiglia (24 m s.m.m.)	51.7	0.385
Pigna (280 m s.m.m.)	61.78	0.362
Valle Tane (1407 m s.m.m.)	59.98	0.538
Colle Melosa (1602 m s.m.m.)	66.77	0.561

Risulta evidente che per un'ampia fascia altimetrica (dai 300 ai 1400 m s.m.m.) non sono disponibili misurazioni. Attraverso un'analisi di regressione lineare sulle piogge centenarie regolarizzate si sono ottenuti i valori dei coefficienti a ed n in funzione dell'altezza sul mare.

I risultati sono riportati in tabella 3.9

Altezza [m s.m.m]	a [mm ore ⁻ⁿ]	n
50	51.29	0.363
150	53.90	0.373
250	55.16	0.383
350	56.00	0.393
450	56.64	0.403
550	57.15	0.413
650	57.58	0.423
750	57.96	0.433
850	58.28	0.443
950	58.58	0.453
1050	58.84	0.463
1150	59.08	0.473
1250	59.31	0.483
1350	59.51	0.493
1450	59.71	0.503
1550	59.89	0.513
1650	60.05	0.523
1750	60.21	0.533
1850	60.37	0.543
1950	60.51	0.553
2050	60.65	0.563

Tabella 3.9 Curva di possibilità pluviometrica in funzione della quota

Prima di poter calcolare la curva di portata è stato necessario tarare i parametri del modello geomorfologico. Non essendo disponibili le misure di alcun evento completo, sono state utilizzate le misure di portata al colmo, registrate dalla stazione di Isolabona a circa 15 km dalla foce.

Con il metodo di Gumbel [Moisello, 1998] la portata centenaria al colmo è stata valutata di circa $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Suddividendo il bacino sotteso dalla sezione di misura (superficie 123 km^2 altezza media 730 m s.m.m.) in sottobacini ed assegnando ad ognuno, in base alla altezza media, la pioggia di progetto si è potuto procedere alla taratura dei parametri verificando che la portata calcolata fosse uguale a quella stimata.

Utilizzando gli stessi parametri, il calcolo della piena di progetto è stato esteso all'intero bacino (superficie 185 km^2 altezza media 666 m s.m.m.).

Variando il tempo di pioggia è stato individuato anche il tempo di corrivazione geomorfoclimatico, ovvero il tempo di pioggia rispetto al quale, assegnate le caratteristiche climatiche, si ottiene la massima portata. Esso è risultato di circa 20 ore.

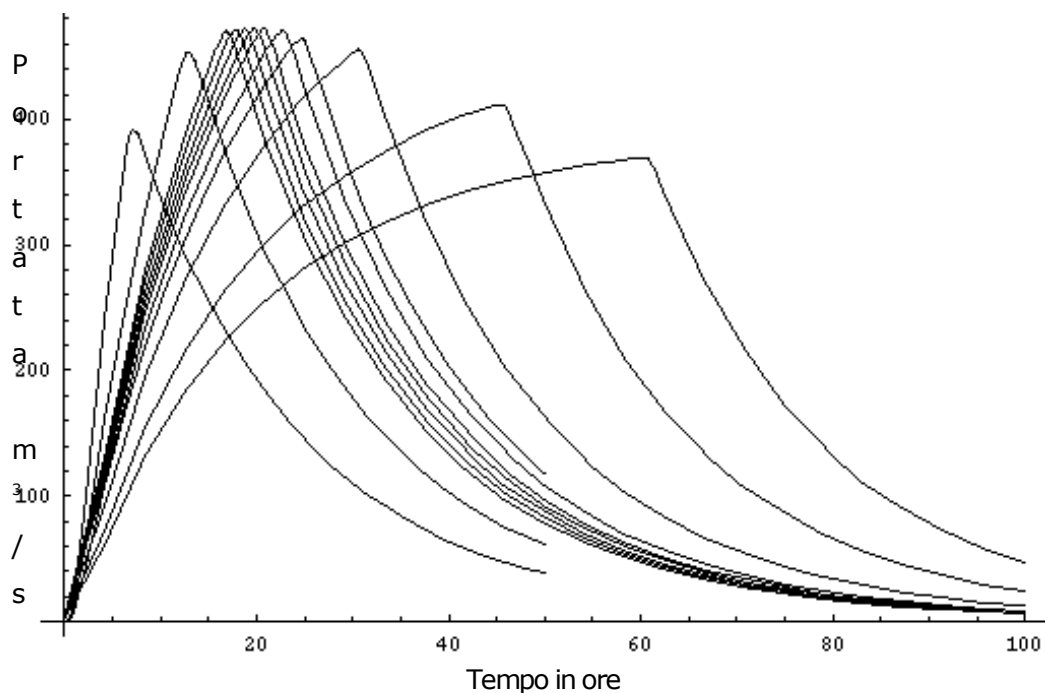


Figura 3.58 Curva di portata per la stima del tempo di corrivazione

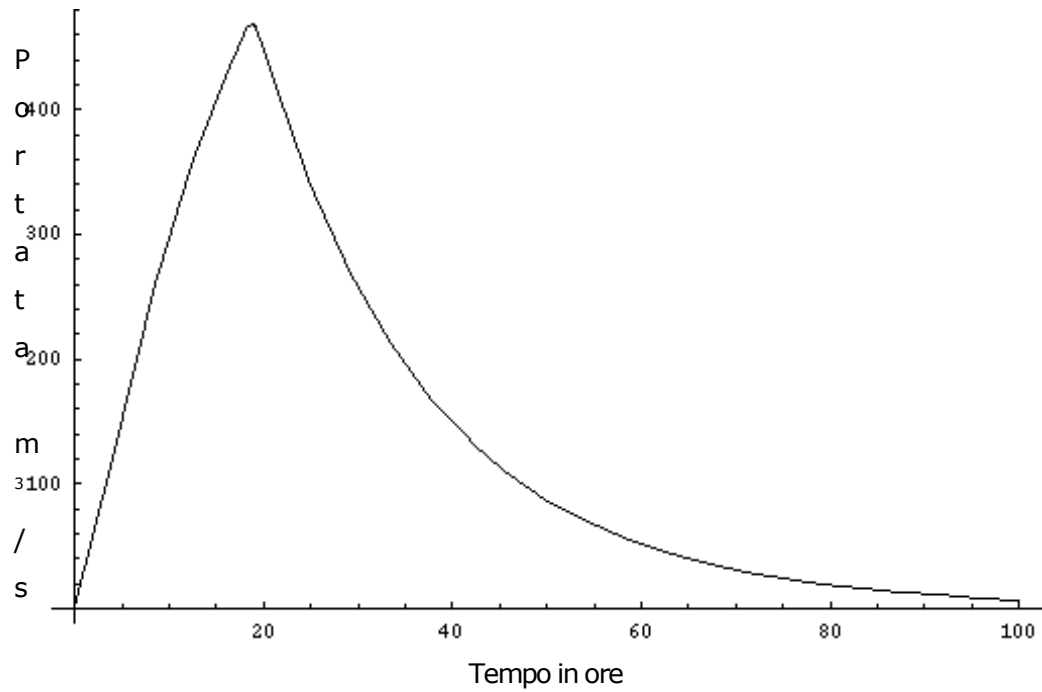
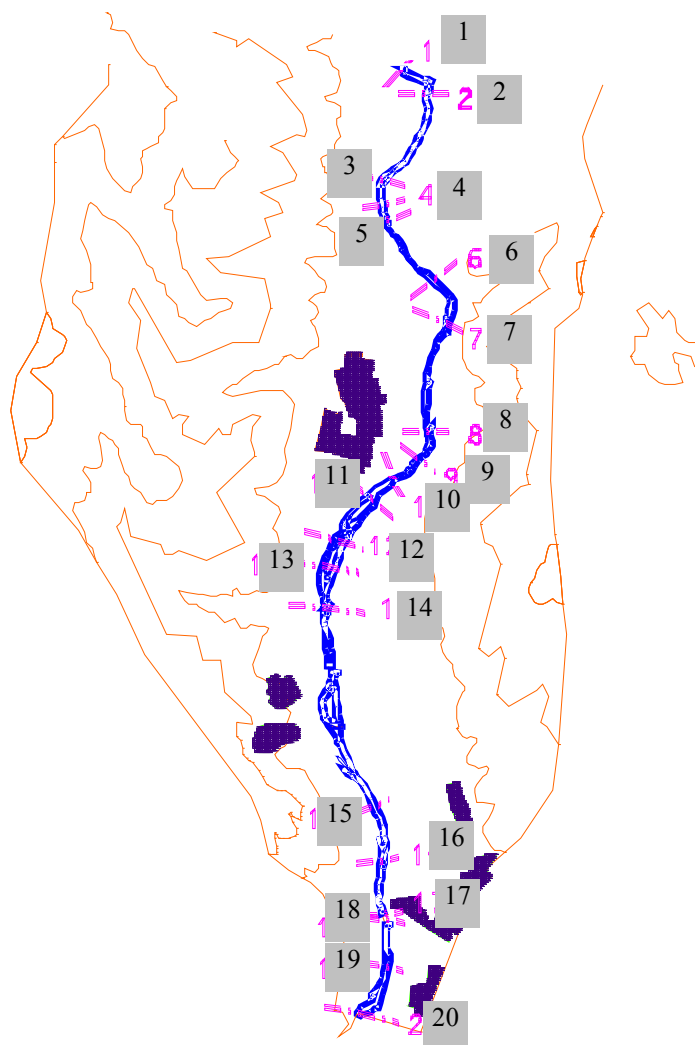


Figura 3.19 Curva della portata di progetto. Portata massima 469 m^3/s dopo 20 ore

3.2.2 PROPAGAZIONE DELL'ONDA DI PIENA

Per calcolare la propagazione dell'onda di piena lungo gli ultimi 6 km del fiume, sono stati utilizzati i rilievi effettuati dalla Regione Liguria nel 1984.





La verifica è stata condotta ipotizzando 3 diverse condizioni di valle:

1. livello del mare costante e pari a 1m s.m.m.
2. livello del mare costante e pari a 2m s.m.m.
3. marea crescente da 1 a 2 metri s.m.m. in 30 minuti.

Nel primo caso i risultati ottenuti mostrano come la piena centenaria resti confinata all'interno dell'alveo, con un dislivello minimo fra superficie libera e sommità degli argini di circa 50 cm (vedi allegati).

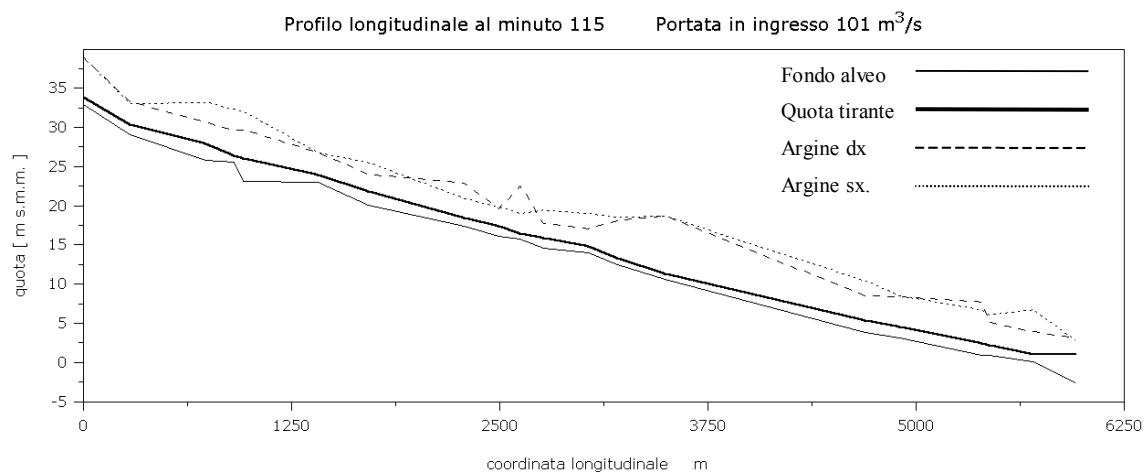


Figura 3.20

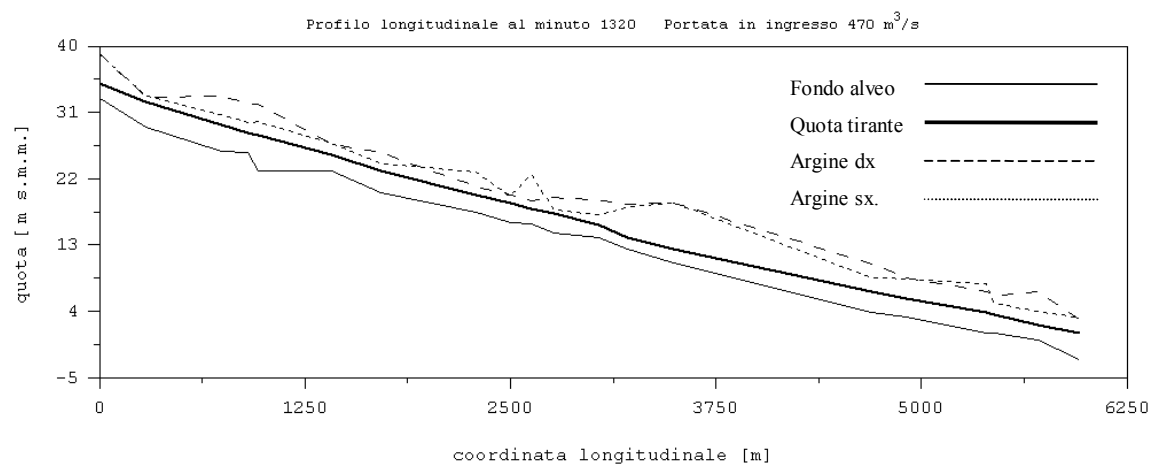


Figura 3.21

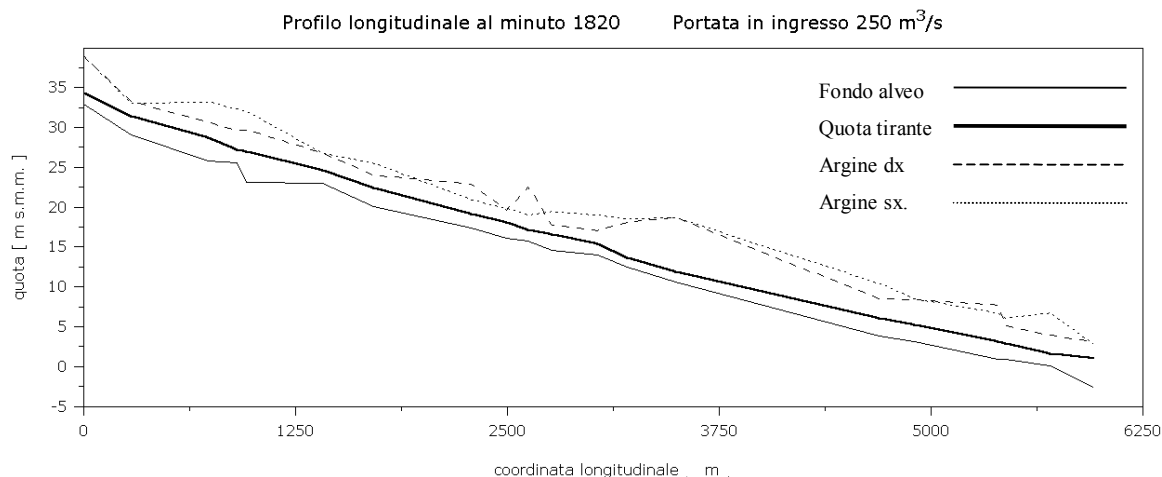
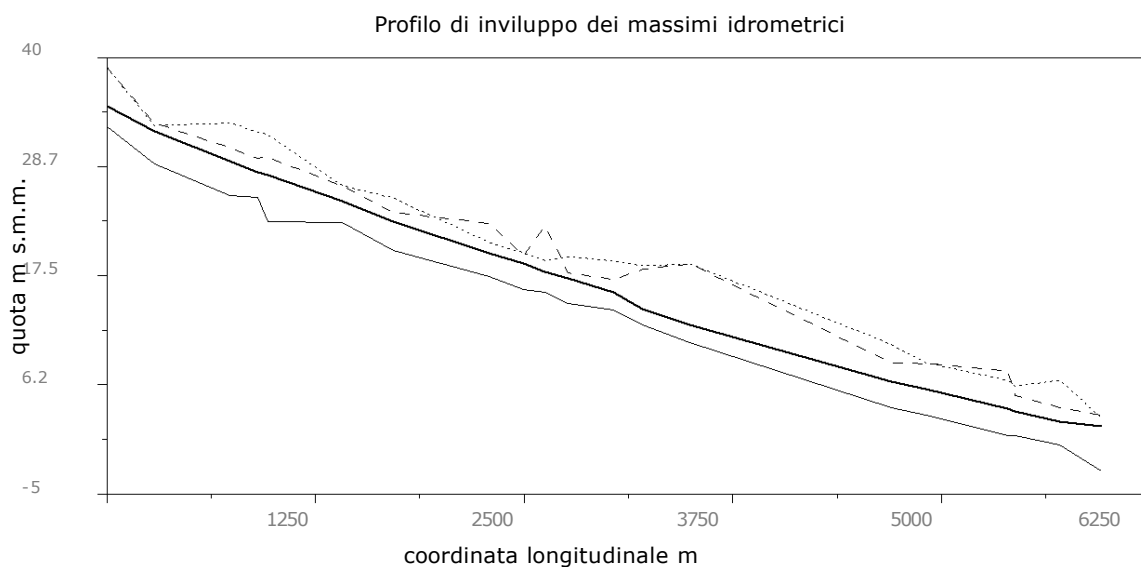


Figura 3.22



Un particolare interesse è stato posto alle sezioni n. 17 e 18 in corrispondenza dei ponti della statale Aurelia e della ferrovia Genova – Ventimiglia. Come mostrato nella Figura 3.23, al colmo della piena le pile sono completamente sommerse.

I due ponti, molto ravvicinati, distano circa 500 m dal mare ed il fondo alveo è circa 1 m s.m.m.; per questo motivo si è voluto verificare quale effetto avesse un ulteriore innalzamento di marea.

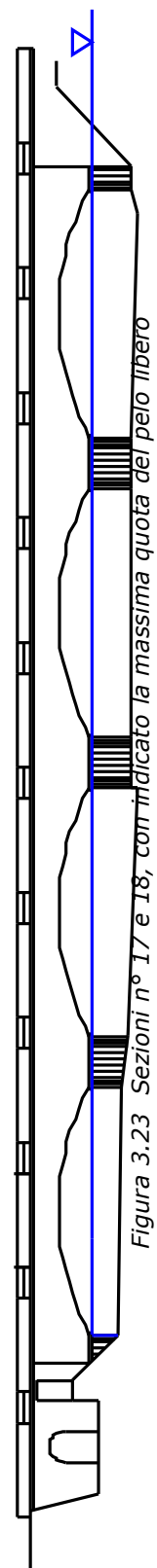
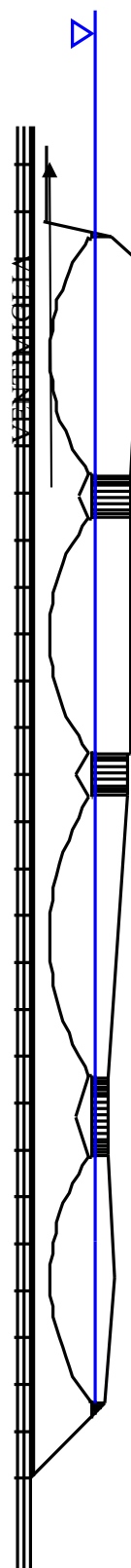
Fissando la marea a 2 m s.m.m. non si sono notati effetti significativi alle sezioni in esame; la stessa situazione si è verificata nel caso di marea montante.



Caso di studio



3.75 m s.m.m.



VENTIMIGLIA s.m.m.



Si deve pertanto concludere che la piena centenaria, in base ai rilievi effettuati nel 1984 può verosimilmente, in presenza di manufatti non correttamente mantenuti, provocare danni ed esondazioni. Piogge con un tempo di ritorno superiore ai cento anni sicuramente causerebbero problemi idraulici.

Occorre anche rilevare, come si osserva dalle foto scattate durante i sopralluoghi dello scorso anno, che la forma della sezioni allo stato attuale sembra mutata. Precisamente le sezioni in prossimità della foce sono ridotte dal trasporto di sedimento marino e una fitta vegetazione ha invaso l'alveo del fiume aumentandone la scabrezza e causando possibilmente un innalzamento ulteriore e pericoloso del livello idrometrico di piena. Possibili decisioni basate sulle simulazioni effettuate dovrebbero dunque tenere presente tutti questi fattori.



Figura 3.24 I ponti della ferrovia e della statale Aurelia ripresi da valle.



Figura 3.25 Il tratto di fiume immediatamente a valle del precedente.



Figura 3.25 Lo sbocco del torrente in mare.

CAPITOLO 4 CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si inserisce nell'ambito dello studio dei sistemi di previsione e prevenzione del rischio idraulico. Lo scopo del lavoro è stato quello di analizzare la possibilità di costruire un sistema informatico integrato, in grado di mantenere controllato il territorio dal punto di vista idrologico ed idraulico.

Di un sistema siffatto si sono analizzate attentamente le componenti ed, in particolare, si è implementato un modello di un bacino a scala regionale. Consentendo una valutazione complessiva delle difficoltà che si possono incontrare nell'affrontare questi lavori.

Questi sistemi sono basati sulla integrazione fra modelli idrologici, idraulici e sistemi di analisi e archiviazione delle informazioni. Per l'analisi e l'archiviazione delle informazioni è stato utilizzato un GIS nel quale sono state inserite: per la cartografia, le carte numeriche di base (acquisite dalla regione Liguria) e quelle tematiche (digitalizzate dal supporto cartaceo); per quanto riguarda le informazioni sono stati inseriti i dati del censimento della popolazione del 1991, i dati del censimento dell'agricoltura del '90, i dati comunali annuali sulle variazioni della popolazione e quelli relativi all'uso del suolo, alla geologia e alle aree in frana. Con questo strumento è stata condotta l'analisi conoscitiva presentata nel capitolo precedente.

Per quanto riguarda la modellistica si sono implementati due modelli, uno per la trasformazione afflussi-deflussi e un altro per la propagazione dell'onda di piena.

Per la trasformazione afflussi deflussi si è fatto ricorso ad un modello geomorfologico semplificato. Il problema della propagazione è stato affrontato creando un modello di de Saint Venant unidimensionale, sufficientemente accurato ed in grado di trattare una vasta gamma di



condizioni al contorno. Nello sviluppo dei modelli si è posta particolare cura nel cercare di ottenere una grande modularità, per facilitare le operazioni di aggiornamento e verifica, ma soprattutto per avere sufficiente elasticità per gestire lo scambio dei dati con altri modelli. I risultati di questa integrazione sono stati mostrati nel capitolo terzo, anche se per ora si tratta di integrazione parziale. I moduli dei programmi sono infatti implementati "off-line", ovvero non completamente integrati nel sistema GIS (una loro integrazione completa richiederebbe semplicemente una riscrittura dei moduli di input-output in modo da essere comandati dall'interno del sistema informativo geografico).

La presente implementazione ha potuto verificare che piogge con un tempo di ritorno centenario possono produrre danni consistenti ed esondazioni nel territorio, soprattutto in presenza di una mancata manutenzione degli alvei e delle sponde.

Per sostenere queste affermazioni con maggiore certezza sarebbe necessario accompagnare i presenti modelli con dei modelli di trasporto solido e, in presenza di manufatti, con un modello bidimensionale, per il quale tuttavia sarebbero necessarie condizioni al contorno più accurate di quelle oggi a nostra disposizione.

L'implementazione di tali modelli esulava dagli ambiti della presente tesi ma, nonostante questo, si è perseguita una struttura modellistica versatile e la loro integrazione, nel futuro non dovrebbe essere difficile.

Un'ultima nota riguarda la qualità dei dati in possesso. Solo di recente infatti si è avviata una raccolta sistematica dei dati di pioggia e di misurazione di portata senza le quali nessun modello può fornire dei risultati verisimili maggiormente attendibili di quelli presentati nella tesi.



ALLEGATI

A Normativa

LEGGE N° 183 / 1989

La legge n° 183 del 18 maggio 1989 – «*Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo*» – è la normativa di riferimento relativa a questo lavoro.

Le finalità principali di questo quadro normativo sono: «*la difesa del suolo, il risanamento delle acque, la fruizione e la gestione del patrimonio idrico per gli usi di razionale sviluppo economico e sociale, la tutela degli aspetti ambientali ad essi connessi*».

Per perseguire questi obiettivi «*la pubblica amministrazione svolge ogni opportuna azione di carattere conoscitivo, di programmazione e di pianificazione degli interventi, di loro esecuzione*».

Importante è la definizione di «bacino idrografico»; esso viene definito come «*il territorio dal quale le acque pluviali o di fusione delle nevi o dei ghiacciai, defluendo in superficie, si raccolgono in un determinato corso d'acqua direttamente o a mezzo di affluenti, nonché il territorio che può essere allagato dal medesimo corso d'acqua, ivi compresi i suoi rami terminali con le foci in mare ed il litorale marino prospiciente*».

Agli articoli 2 e 3 vengono specificate le attività – conoscitiva, di pianificazione, di programmazione e di attuazione – con riferimento alle finalità e agli adempimenti relativi agli



interventi sui bacini idrografici, sui corsi d'acqua e sulle coste, sia per le acque superficiali che sotterranee.

Al capo II vengono definiti i soggetti centrali e le loro competenze, mentre al capo III si analizzano gli enti decentrati (le Regioni, gli Enti locali e le Autorità di bacino di rilievo nazionale).

Le funzioni delle Regioni sono specificate all'articolo 10 e le più importanti sono: la delimitazione dei bacini idrografici di propria competenza; la collaborazione nel rilevamento e nell'elaborazione del progetto di piano dei bacini di rilievo nazionale; elaborano i piani per quelli regionali ed interregionali; provvedono alle opere e agli interventi da realizzare per il servizio di polizia idraulica, di piena, di pronto intervento.

Infine, elemento non trascurabile, le Regioni *«predispongono annualmente la relazione sull'uso del suolo e sulle condizioni dell'assetto idrogeologico del territorio di competenza e sullo stato di attuazione del programma triennale in corso e la trasmettono al Comitato nazionale per la difesa del suolo»*.

Al titolo II della legge vengono poi stabiliti gli ambiti, gli strumenti necessari, gli interventi e le risorse.

In particolare, vengono classificati i bacini idrografici suddividendoli in bacini nazionali, interregionali, regionali, specificandone anche i limiti amministrativi (Art. 13).

L'articolo 17 di riferisce al valore, alle finalità e ai contenuti del Piano di bacino: *«il piano di bacino ha valore di piano territoriale di settore ed è lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo e la corretta utilizzazione delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche ed ambientali del territorio interessato»*.

Vengono poi specificati nel dettaglio quali debbano essere i contenuti del Piano di bacino (interventi operativi e gestionali).

Inoltre, tutti i piani ed i programmi di sviluppo devono essere coordinati con il piano medesimo.

LEGGE REGIONALE N° 9/1993 E SUCCESSIVE

MODIFICHE

In ottemperanza alla legge n° 183 del 1989, la Regione Liguria ha emesso la legge n° 9 del 28 Gennaio 1993, modificata successivamente dalla n° 18 del 28 Aprile 1993, con i medesimi criteri e finalità.

Le attività programmatiche devono contenere i criteri per la formazione, il coordinamento e la verifica di efficacia dei piani di bacino idrografico; inoltre, il coordinamento con altri piani e programmi regionali devono essere conformi alle norme comunitarie e Nazionali, devono tendere ad un sistema informativo unico nazionale, all'individuazione di tutti i risanamenti e le razionali utilizzazioni delle risorse idriche ed altre varie funzioni ugualmente importanti.

Le attività di pianificazione riguardano la compilazione e l'aggiornamento dei piani di bacino ed il riordino del vincolo idrologico.

Le attività realizzative curano le opere di consolidamento a difesa, le opere di bonifica, di sistemazione e regolazione dei corsi d'acqua, di protezione delle coste, la manutenzione ordinaria, la prevenzione e l'allerta, gli studi relativi alla valutazione di impatto ambientale delle opere.

È importante sottolineare che il Consiglio regionale delimita i bacini idrografici, approva i piani di bacino ed i programmi organici di intervento.

Nel titolo III della legge si definiscono le «Autorità di bacino».

A livello regionale viene istituito un Comitato Istituzionale che stabilisce i criteri, metodi ed obiettivi per l'elaborazione dei singoli piani di bacino; delibera su di essi e su piani triennali di intervento; detta i tempi per la loro realizzazione; assicura il coordinamento di questi con i piani di risanamento e di tutela delle acque.

Inoltre verifica l'attuazione dei piani di bacino, stabilisce criteri e direttive per il rilascio di provvedimenti, autorizzazioni e concessioni e, molto importante, coordina l'attività della rete regionale di rilevamento dei dati geofisici ed ambientali di intesa con i servizi nazionali.

Accanto a quello istituzionale viene istituito il Comitato Tecnico regionale quale organo tecnico amministrativo dell'Autorità di bacino. Esso ha il compito di esprimere parere sul piano di bacino e predisporre il programma triennale di intervento.

Oltre ai vari funzionari e dirigenti, fanno parte di questo organo anche «*cinque esperti di elevato livello scientifico o tecnico-operativo nelle materie trattate nei piani di bacino, nominati dalla giunta regionale in modo che nell'ambito del comitato siano comprese, tra le altre, le*



seguenti competenze specifiche: geologia, geomorfologia ed idrologia, scienze forestali ed pedologiche, scienze naturali, chimica ambientale ed ingegneria idraulica».

Al titolo III si delineano i piani di bacino ed i piani triennali.

Tra i contenuti di un piano di bacino, per le caratteristiche di questo lavoro, di particolare interesse sono:

«l'individuazione e qualificazione delle situazioni, in atto e potenziali, di degrado del sistema fisico, nonché delle relative cause»;

«le direttive alle quali devono uniformarsi la difesa del suolo, la sistemazione idrogeologica ed idraulica e l'utilizzazione delle acque dei suoli»;

«l'indicazione delle opere necessarie e distinte in funzione: dei pericoli di esondazione e della gravità e della estensione del dissesto ... , del ripristino fluviale in caso di particolari situazioni di degrado nonché del tempo necessario per assicurare l'efficacia degli interventi» ;

«l'indicazione delle zone da assoggettare a speciali vincoli e prescrizioni in rapporto alle specifiche condizioni idrogeologiche, ai fini della conservazione del suolo, della tutela dell'ambiente e della prevenzione contro presumibili effetti dannosi di interventi antropici...»;

«le priorità degli interventi ed il loro organico sviluppo nel tempo in relazione alla gravità del dissesto, del degrado o dell'inquinamento».

Questi sono solo alcuni dei ben ventuno punti che riguardano i contenuti del piano di bacino e che giustificano la fondamentale importanza di redigere ed adottare tale strumento di lavoro.

Infine, nelle norme transitorie e finali vengono vietati, fino all'approvazione dei piani di bacino, una serie di interventi ed attività che per la loro rilevanza di impatto ambientale possono impedire «*un costante equilibrio idraulico idrogeologico ed idrogeomorfologico di base*».

LEGGE REGIONALE N. 45 / 1994

La Legge Regionale n° 45 del 16 agosto 1994, recante titolo «*Norme in materia di sicurezza urbana da rischi idrogeologici*», che, utilizzando i criteri applicativi della legge n° 9 del 28 gennaio 1993 (art. 1 comma 3), intende «*disciplinare gli interventi straordinari in materia di*



difesa del suolo soprattutto orientati alla difesa dalle calamità naturali ed alla salvaguardia dell'ambiente, volti al fine di prevenire o ridurre situazioni di pericolo o danno alla salute pubblica e all'ambiente».

All'art. 2 (*Rischio idrogeologico ed ambientale*), si estendono le finalità dell'articolo 1 anche alla «definizione di un uso compatibile del territorio in rapporto ai rischi derivanti da intensi fenomeni meteorologici, il risanamento, la tutela e il ripristino della struttura ambientale, tenuto conto degli insediamenti e delle infrastrutture esistenti».

Inoltre, al comma 2, si definiscono gli interventi che consistono «nella realizzazione delle opere di consolidamento nelle zone che hanno subito dissesti idrogeologici e delle opere di riassetto idraulico della rete idrografica superficiale nelle aree colpite del 1993 ai sensi del D.L. 30 maggio 1994 n.328, convertito con modificazioni, dalla Legge 25 luglio 1994 n.471»,

L'art. 3 comma 2 lettera b) (*Stesura di mappe delle aree esondate*) è di particolare interesse in quanto investe questo lavoro di tesi di un significativo extra-didattico; in detto articolo (*Interventi per la sicurezza urbana da eventi meteorologici*) è riportato:

nel contesto dell'organizzazione della difesa del suolo di cui alla L.R. n° 9/1993, con particolare riferimento al problema della sicurezza urbana sono individuate le seguenti attività strutturate su:

- a) azioni informative e previsionali;
- b) manutenzioni di ecosistemi fluviali;
- c) interventi strutturali.

le azioni di cui alla lettera a) del comma 1 devono consentire di ridurre le condizioni di vulnerabilità da ricondursi alla situazione di gravità in rapporto alle conseguenze derivanti da rischi connessi a dissesti idrogeologici e della rete idrografica superficiale attraverso le seguenti strategie di intervento:

- a) predisposizione di una rete di monitoraggio degli eventi meteorologici;
- b) stesura di mappe delle aree esondate;
- c) informazione da parte dei Comuni agli abitanti di suddette aree.

Nell'art. 4 sono riportati i criteri per il censimento delle aree storicamente esondate e le modalità per l'invio della documentazione alla Regione ed alla Provincia che, dopo aver provveduto alla mappatura, «procede alla formulazione di indirizzi finalizzati alla sicurezza nonché alla progettazione di sistemi di allerta di cui all'art.5».



All'art. 6 si forniscono le indicazioni relative alle priorità degli interventi da finanziare e all'art. 7 si dettano i criteri per gli interventi di rinaturalizzazione.

L'art. 8 è il programma degli interventi con la relativa spartizione delle risorse disponibili in Lit. 39.500.000.000 e sono orientate al finanziamento di:

- a) azioni informative e previsionali;
- b) manutenzione di ecosistemi fluviali;
- c) interventi strutturali da realizzarsi nel biennio 1994/95.

MAPPATURA DELLE AREE INONDABILI

Esiste un documento del «Comitato tecnico di bacino» che nell'allegato 1 (mappatura delle aree inondabili) contiene le norme tecniche per la corretta procedura.

La premessa di questo documento recita quanto segue:

«Come ampiamente ricordato dal documento, redatto dalla Commissione Scientifica per la Difesa del Suolo, costituita a norma di legge n° 183/89, obiettivo della pianificazione di bacino è l'individuazione dei maggiori squilibri presenti nei bacini idrografici e al conseguente pianificazione degli interventi atti a ridurne, fino a configurare un ambiente sostenibile.

L'autorità di bacino dei bacini regionali liguri individua tra i maggiori squilibri esistenti il rischio di inondazione delle aree urbane e determina di conseguenza che le azioni conoscitive devono essere innanzitutto indirizzate alla quantificazione del rischio intesa come determinazione della causa dei fenomeni.

Il quadro conoscitivo emergente, con dettaglio informativo omogeneo per tutta l'area di competenza dell'Autorità, consente di pianificare gli interventi in una scala di priorità ordinata alla rimozione dei rischi maggiori; di pianificare altresì, anche se non proprio dell'Autorità del bacino, gli interventi di protezione civile.

La mappatura delle aree soggette a rischio di inondazione consiste in una procedura che: riconosce innanzitutto i maggiori eventi che si sono dati sul territorio interessato e pone a



disposizione tutta l'informazione necessaria a ricostruire le cause, naturali ed antropiche, degli eventi dannosi quantificandone gli effetti;

valuta successivamente sulla base della struttura morfoclimatica degli eventi di precipitazione storici, regionalizzati in relazione alle diverse aree regionali e caratterizzati, ove possibile in termini di probabilità di evenienza, quali possano essere gli effetti idrologici anche in bacini ove, per l'aleatorietà degli eventi stessi, non si abbia memoria recente di fatti estremi e determina quindi idraulicamente le aree potenzialmente a rischio di inondazione».

Il resto del documento è diviso in due capitoli.

Il primo, recante titolo «*Mappatura delle aree inondate*», detta la procedura corretta per produrre un rapporto nel quale siano individuate le relazioni di causa ed effetto tra gli eventi naturali ed antropici che hanno prodotto i fenomeni di inondazione urbana di cui esiste memoria documentale.

Esso è suddiviso in sette sottocapitoli in ognuno dei quali viene descritta una parte del rapporto in relazione alla dinamica del versante e d'asta, all'idraulica e, per ultima, alla mappatura delle aree esondate.

Il secondo capitolo, recante titolo «*Mappatura delle aree inondabili*» detta la procedura dalla quale discendono e prendono ispirazione i capitoli di questo lavoro.

Esso recita quanto segue:

«Per tutte le aree urbane che siano contigue ai corsi d'acqua si provvederà a valutare, in base alle portate al colmo di piena ed agli ideogrammi di piena determinati dal settore Difesa del Suolo della Regione per i periodi di ritorno compresi tra 50 e 250 anni, l'andamento dei tiranti idrici al colmo di piena in prossimità dei tratti temibilmente soggetti ad esondazione o ad importanti erosioni spondali, con particolare riguardo a tutte le sezioni interessate da attraversamenti e coperture.

Ove non disponibili sono effettuati i rilievi longitudinali e trasversali dei tratti d'asta d'interesse, restituendoli alle scale specifiche.

I rilievi utilizzati per le valutazioni idrauliche saranno conservati nel rapporto.

Per tutte le sezioni in cui il tirante idrico non abbia capienza certa nel letto naturale, anche in conseguenza di una possibile dinamica dei versanti e d'asta, è valutato il volume d'acqua che ha presumibilmente recapito nell'area urbana ed è ricostruita, mediante valutazione della topologia della struttura urbana, l'estensione areale della possibile inondazione:

in relazione ai sistemi di drenaggio e all'evento idrologico il tempo di permanenza delle acque nella zona urbana;

in relazione alla morfologia dei manufatti inondati la velocità di deflusso ed i tiranti massimi.



Le aree di possibile inondazione sono cartografate in scala 1:5000 e se opportuno, a scala catastale; sono indicate sulla cartografia, in modo che tali elementi siano rappresentabili sugli edifici ed i manufatti esistenti nelle aree a rischio, i tiranti massimi di inondazione al di sopra del livello del suolo, insieme all'uso cui sono destinate.

Ove possibile l'informazione sarà riportata su supporto digitale senza perdita di risoluzione.

I risultati sono corredati da una sezione che qualifica l'incertezza delle valutazioni».



B File di input

```
/** This_is_a_turtle_file. Author: Angelo Zacchia. Date: 080998.
*/
/**
File modificato per l'inserimento di dati sulle sezioni

The line below with the number of object one expects
to find is mandatory. The keyword index is followed by an integer
representing
the number of blocks
Comments can be anywhere out of the body of the matrixes.  */
index {20}

/* iniziamo con le sezioni disposte da monte verso valle*/
1: double list sezione_58 {1,1,11,11,1,2}
11
0
0 0 6.8 8.8 14.8 23 39.2 47.2 55.3 62.1 62.1
39 37.5 34.25 33.65 32.9 32.9 33.2 33.4 34.35 37.3 39
35.001
1 11

2: double list sezione_59 {1,1,11,11,1,2}
11
285
0 2 7.30 8.5 10.7 19 29.8 34 34.5 48 98
33.26 30.97 29.64 30.23 29.49 29.05 29.05 30.16 31.39 32.99 33.99
35.001
1 10

3: double list sezione_60 {1,1,11,11,1,2}
11
740
0 4 35 38 48 57 64.3 67.5 72.1 75.2 75.2
30.65 28.04 29.05 27.65 26.32 26.3 26.42 25.77 27.67 28.20 33.22
35.001
1 11

4: double list sezione_61 {1,1,11,11,1,2}
11
905
0 16 20.7 24.3 24.3 26.3 26.3 43.5 58.2 67.5 67.5
29.6 29.57 28.02 28.02 27.2 27.2 26.17 25.84 25.52 28.50 32.29
35.001
2 11

5: double list sezione_62 {1,1,10,10,1,2}
10
963
0 15 15 24.4 26.8 39.8 41.6 43 57 57
30 29.7 27.3 25.2 25.8 24.3 24.8 24.6 23.1 32.04
35.001
2 10

6: double list sezione_63 {1,1,8,8,1,2}
```



```
8
1410
0 11.2 13.8 31 52 64 81 91
26.69 26.78 24.68 22.98 23.08 23.61 26.77 26.9
35.001
2 7

7: double list sezione_64 {1,1,10,10,1,2}
10
1715
0 5.2 13.8 29.5 33.4 40.2 52.7 52.7 78.2 88.2
24.02 20.98 21.21 20.44 20.64 20.08 22.93 24.51 25.5 25.6
35.001
1 9

8: double list sezione_65 {1,1,9,9,1,2}
9
2288
0 0 5 13 19.8 30.3 63.8 83.1 83.6
22.9 21.45 21.45 19.10 18.14 17.4 17.99 18.13 20.93
35.001
1 9

9: double list sezione_66 {1,1,11,11,1,2}
11
2498
0 6.1 12.1 40.4 48.4 53.6 56.6 57 63.9 70.1 84.7
19.60 17.35 16.15 16.07 17.64 17.88 17.95 19.82 20.24 20.09 20.4
35.001
1 8

10: double list sezione_67 {1,1,11,11,1,2}
11
2626
0 10.6 13.6 25.6 31.6 40.6 62.6 63.6 75.3 79.1 94.6
22.58 16.69 15.85 15.85 16.05 15.8 15.82 17.2 17.97 19.01 19.3
35.001
1 10

11: double list sezione_68 {1,1,8,8,1,2}
8
2766
0 12.1 18.5 46.2 77.3 79.3 96.5 110
17.72 17.75 15.20 14.59 14.7 16.87 19.46 19.48
35.001
2 7

12: double list sezione_69 {1,1,9,9,1,2}
9
3036
0 16 26.5 26.5 48 84.7 86.5 91 95.5
17.08 15.64 14.65 13.95 13.96 15.15 16.23 16.59 18.99
35.001
1 9

13: double list sezione_70 {1,1,13,13,1,2}
13
3211
0 3 4.5 30.6 46.1 99.9 127.6 134 170.4 179.9 210.1 219.1 245.4
```



20.6 20.6 19.3 18.14 13.29 12.6 12.45 12.87 13.10 18.51 18.50
18.50 21
35.001
4 10

14: double list sezione_71 {1,1,12,12,1,2}
12
3493
0 1 10 24 37 60 83 93.5 106 106 147 154
18.7 17.8 11.05 11.4 10.85 10.6 10.65 10.6 16.1 18.7 17.4 17.4
35.001
1 10

15: double list sezione_72 {1,1,11,11,1,2}
11
4698
0 4 7 31.2 39 46.4 49 67 71.8 71.8 84.3
8.5 5.28 3.87 4.19 5.41 5.36 4.76 4.89 5.76 10.4 11.3
35.001
1 10

16: double list sezione_73 {1,1,14,14,1,2}
14
4906
0 1.5 3.7 8.1 8.8 12 25.3 38.6 41.4 46 89.2 98 106.3 114.3
8.4 6.7 4.5 4.41 3.77 3.26 3.34 3.15 4.47 4.52 4.06 8.50 9.30
9.37
35.001
1 12

17: double list sezione_74 {1,1,10,10,1,2}
10
5396
0 4.8 12.8 20.65 38.75 53.95 61.65 67.9 69.25 70.2
7.7 2.95 2.3 2.7 1.5 1.4 0.95 1.1 2.5 6.7
35.001
1 10

18: double list sezione_75 {1,1,13,13,1,2}
13
5443
0 1.1 7.1 7.1 8.35 11.25 27.15 43.05 58.95 73.35 74.85 76.35
81.45
7.7 3.4 3.4 5.1 5.1 2.15 1.9 0.95 1.35 0.95 1.35 1.35 6.1
35.001
5 13

19: double list sezione_76 {1,1,16,16,1,2}
16
5707
0 5 5 23.6 25.4 25.4 26.9 26.9 56 56 58 83.6 87.6 88.1 112.2
112.2
3.5 3.5 3.9 3.91 3.91 1.5 1.02 0.16 0.06 0.32 0.22 1.11 2.11 2.61
2.61 6.7
35.001
5 16

20: double list sezione_77 {1,1,8,8,1,2}
8
5960



Allegati

0 54.1 89.6 144.1 162.5 168.1 168.6 193.1
2.9 3.1 0.9 -1.83 -2.63 -1.43 1.2 2.82
35.001
2 8



C File di Output

Il file di output nel quale sono leggibili le grandezze idrodinamiche calcolate ha una struttura essenziale, perché non è stato pensato per essere letto direttamente dall'utente, ma per essere interpretato da altri programmi.

In questo file vengono visualizzati con un intervallo temporale scelto dall'utente matrici di n righe, dove n è il numero delle sezioni, e 8 colonne che rappresentano, da sinistra a destra:

Il numero di Froude, la coordinata longitudinale della sezione, la quota della superficie libera, la portata, la velocità, la quota del fondo dell'alveo, la quota dell'argine destro e quella dell'argine sinistro.

a) in fase crescente

```
*** { 6, 20} tempo 6301.302307
1.287344 0.000000 33.86002 96.260511 3.370398 32.891800 39.000000 39.000000
0.882419 285.000000 30.29072 95.202151 2.653700 29.039200 33.260000 32.990000
0.854363 740.000000 27.85978 94.593774 2.995569 25.770000 30.650000 33.220000
1.195919 905.000000 26.39639 94.345557 2.734705 25.520000 29.570000 32.290000
0.630394 963.000000 26.02808 93.642067 2.329315 23.100000 29.700000 32.040000
0.994904 1410.000000 23.90969 92.705839 2.566665 22.980000 26.780000 26.770000
0.729859 1715.000000 21.78237 91.667437 2.247238 20.080000 24.020000 25.500000
0.911839 2288.000000 18.43316 90.478058 2.210753 17.400000 22.900000 20.930000
0.791507 2498.000000 17.34435 89.998396 2.535310 16.070000 19.600000 19.820000
0.829032 2626.000000 16.41994 89.613967 1.927126 15.800000 22.580000 19.010000
0.587499 2766.000000 15.84303 88.830458 1.886998 14.590000 17.750000 19.460000
0.862764 3036.000000 14.80667 88.161900 2.090717 13.950000 17.080000 18.990000
0.861475 3211.000000 13.28932 87.330144 1.790080 12.450000 18.140000 18.510000
0.832297 3493.000000 11.33304 84.885501 1.890038 10.600000 18.700000 18.700000
0.589440 4698.000000 5.31038 81.087084 1.676406 3.870000 8.500000 10.400000
0.769572 4906.000000 4.52465 78.695732 1.826482 3.150000 8.400000 8.500000
0.654643 5396.000000 2.33359 77.181141 1.868380 0.950000 7.700000 6.700000
0.667695 5443.000000 2.13831 76.400023 1.758269 0.950000 5.100000 6.100000
0.288136 5707.000000 1.08555 76.035880 0.768942 0.060000 3.910000 6.700000
0.110889 5960.000000 1.00010 76.035880 0.484637 -2.630000 3.100000 2.820000

*** { 6, 20} tempo 6600.926582
1.292503 0.000000 33.86962 99.119775 3.402599 32.891800 39.000000 39.000000
0.882321 285.000000 30.31544 98.084025 2.683852 29.039200 33.260000 32.990000
0.859083 740.000000 27.87699 97.489493 3.026941 25.770000 30.650000 33.220000
1.187670 905.000000 26.41497 97.242848 2.760497 25.520000 29.570000 32.290000
0.633019 963.000000 26.05037 96.535380 2.354469 23.100000 29.700000 32.040000
0.996444 1410.000000 23.92753 95.579901 2.596190 22.980000 26.780000 26.770000
0.733504 1715.000000 21.79615 94.600285 2.272344 20.080000 24.020000 25.500000
0.910834 2288.000000 18.44960 93.491215 2.236380 17.400000 22.900000 20.930000
0.796053 2498.000000 17.36102 93.043891 2.565657 16.070000 19.600000 19.820000
0.826464 2626.000000 16.43652 92.672240 1.948518 15.800000 22.580000 19.010000
0.590533 2766.000000 15.86360 91.892836 1.914112 14.590000 17.750000 19.460000
0.868079 3036.000000 14.81881 91.246201 2.114159 13.950000 17.080000 18.990000
0.861197 3211.000000 13.30039 90.507166 1.811119 12.450000 18.140000 18.510000
0.835171 3493.000000 11.34520 87.690097 1.908908 10.600000 18.700000 18.700000
0.593137 4698.000000 5.32887 85.185487 1.700976 3.870000 8.500000 10.400000
```



0.762440	4906.000000	4.55201	83.338255	1.851316	3.150000	8.400000	8.500000
0.661260	5396.000000	2.36694	81.577577	1.891374	0.950000	7.700000	6.700000
0.671540	5443.000000	2.17086	80.578605	1.798053	0.950000	5.100000	6.100000
0.300483	5707.000000	1.09561	79.871209	0.805151	0.060000	3.910000	6.700000
0.116482	5960.000000	1.00010	79.871209	0.509082	-2.630000	3.100000	2.820000

*** { 6, 20 } tempo 6901.031372

1.297338	0.000000	33.87919	101.970023	3.433889	32.891800	39.000000	39.000000
0.882283	285.000000	30.33971	100.947842	2.713204	29.039200	33.260000	32.990000
0.863610	740.000000	27.89384	100.360052	3.057376	25.770000	30.650000	33.220000
1.180172	905.000000	26.43318	100.117542	2.785815	25.520000	29.570000	32.290000
0.635604	963.000000	26.07208	99.428154	2.379058	23.100000	29.700000	32.040000
0.998032	1410.000000	23.94539	98.507793	2.625582	22.980000	26.780000	26.770000
0.736805	1715.000000	21.81009	97.488487	2.296568	20.080000	24.020000	25.500000
0.910053	2288.000000	18.46521	96.390445	2.260733	17.400000	22.900000	20.930000
0.800188	2498.000000	17.37665	95.953726	2.594112	16.070000	19.600000	19.820000
0.824187	2626.000000	16.45218	95.593437	1.968559	15.800000	22.580000	19.010000
0.593282	2766.000000	15.88296	94.875829	1.939286	14.590000	17.750000	19.460000
0.873155	3036.000000	14.83160	94.173718	2.137660	13.950000	17.080000	18.990000
0.861524	3211.000000	13.30961	93.570316	1.829910	12.450000	18.140000	18.510000
0.836250	3493.000000	11.35941	90.346306	1.925679	10.600000	18.700000	18.700000
0.595754	4698.000000	5.34252	88.169905	1.718794	3.870000	8.500000	10.400000
0.758083	4906.000000	4.57108	86.872820	1.869111	3.150000	8.400000	8.500000
0.667712	5396.000000	2.39457	85.580505	1.914027	0.950000	7.700000	6.700000
0.676105	5443.000000	2.19946	84.832045	1.844558	0.950000	5.100000	6.100000
0.315878	5707.000000	1.10391	84.419312	0.849214	0.060000	3.910000	6.700000
0.123115	5960.000000	1.00010	84.419312	0.538071	-2.630000	3.100000	2.820000

b) al colmo

*** { 6, 20 } tempo 68702.121681

1.301310	0.000000	34.95818	467.381029	5.179999	32.891800	39.000000	39.000000
0.878791	285.000000	32.34822	467.512596	4.203456	29.039200	33.260000	32.990000
1.080687	740.000000	29.29498	467.591477	4.425167	25.770000	30.650000	33.220000
1.034814	905.000000	28.14899	467.631703	4.436106	25.520000	29.570000	32.290000
0.774353	963.000000	27.87497	467.714974	4.175383	23.100000	29.700000	32.040000
1.135639	1410.000000	25.22009	467.796126	4.599810	22.980000	26.780000	26.770000
0.891064	1715.000000	23.07034	467.955351	3.979452	20.080000	24.020000	25.500000
0.914687	2288.000000	19.75628	468.086127	3.852629	17.400000	22.900000	20.930000
0.947197	2498.000000	18.73901	468.144452	4.248842	16.070000	19.600000	19.820000
0.876614	2626.000000	17.85766	468.190405	3.548213	15.800000	22.580000	19.010000
0.814438	2766.000000	17.25378	468.254117	3.839458	14.590000	17.750000	19.460000
1.120042	3036.000000	15.74376	468.308818	3.925986	13.950000	17.080000	18.990000
0.959156	3211.000000	14.04045	468.343948	3.245967	12.450000	18.140000	18.510000
0.886323	3493.000000	12.43150	468.747911	3.456089	10.600000	18.700000	18.700000
0.743885	4698.000000	6.57229	468.913418	3.219628	3.870000	8.500000	10.400000
0.798664	4906.000000	5.76054	468.924618	3.319875	3.150000	8.400000	8.500000
0.826420	5396.000000	3.75173	469.103999	3.556561	0.950000	7.700000	6.700000
0.833975	5443.000000	3.53312	469.227665	3.726732	0.950000	5.100000	6.100000
0.690464	5707.000000	2.26490	465.118876	2.895668	0.060000	3.910000	6.700000
0.480457	5960.000000	1.60278	465.118876	2.218745	-2.630000	3.100000	2.820000

*** { 6, 20 } tempo 69001.385399

1.301662	0.000000	34.95524	466.396447	5.177335	32.891800	39.000000	39.000000
0.878592	285.000000	32.34496	466.696234	4.201096	29.039200	33.260000	32.990000
1.080781	740.000000	29.29324	466.860492	4.423382	25.770000	30.650000	33.220000
1.034904	905.000000	28.14643	466.937517	4.434219	25.520000	29.570000	32.290000
0.774285	963.000000	27.87247	467.091334	4.173254	23.100000	29.700000	32.040000
1.135485	1410.000000	25.21876	467.216556	4.597693	22.980000	26.780000	26.770000
0.890967	1715.000000	23.06879	467.361152	3.977606	20.080000	24.020000	25.500000
0.914608	2288.000000	19.75476	467.474218	3.850817	17.400000	22.900000	20.930000



0.947191	2498.000000	18.73730	467.527498	4.247243	16.070000	19.600000	19.820000
0.876461	2626.000000	17.85590	467.572701	3.546538	15.800000	22.580000	19.010000
0.814192	2766.000000	17.25219	467.641953	3.837359	14.590000	17.750000	19.460000
1.119859	3036.000000	15.74268	467.697958	3.924037	13.950000	17.080000	18.990000
0.959198	3211.000000	14.03954	467.785206	3.244906	12.450000	18.140000	18.510000
0.886289	3493.000000	12.43002	468.140702	3.454405	10.600000	18.700000	18.700000
0.743695	4698.000000	6.57105	468.403377	3.217795	3.870000	8.500000	10.400000
0.798837	4906.000000	5.75983	468.495900	3.319959	3.150000	8.400000	8.500000
0.827758	5396.000000	3.74868	468.678173	3.559543	0.950000	7.700000	6.700000
0.819667	5443.000000	3.52938	468.781481	3.659625	0.950000	5.100000	6.100000
0.626742	5707.000000	2.33931	463.441365	2.680855	0.060000	3.910000	6.700000
0.431228	5960.000000	1.80238	463.441365	2.019341	-2.630000	3.100000	2.820000
*** { 6, 20 } tempo 69300.831657							
1.302030	0.000000	34.95166	465.118492	5.173831	32.891800	39.000000	39.000000
0.878203	285.000000	32.34047	465.446774	4.197292	29.039200	33.260000	32.990000
1.080915	740.000000	29.29042	465.628528	4.420408	25.770000	30.650000	33.220000
1.035117	905.000000	28.14190	465.718419	4.431100	25.520000	29.570000	32.290000
0.774147	963.000000	27.86788	465.901688	4.169274	23.100000	29.700000	32.040000
1.135277	1410.000000	25.21602	466.083342	4.593774	22.980000	26.780000	26.770000
0.890982	1715.000000	23.06574	466.425698	3.974893	20.080000	24.020000	25.500000
0.914576	2288.000000	19.75264	466.689761	3.848630	17.400000	22.900000	20.930000
0.947225	2498.000000	18.73518	466.804786	4.245440	16.070000	19.600000	19.820000
0.876311	2626.000000	17.85389	466.893838	3.544724	15.800000	22.580000	19.010000
0.813941	2766.000000	17.25049	467.014238	3.835174	14.590000	17.750000	19.460000
1.119679	3036.000000	15.74167	467.106559	3.922176	13.950000	17.080000	18.990000
0.959173	3211.000000	14.03863	467.204103	3.243614	12.450000	18.140000	18.510000
0.886217	3493.000000	12.42860	467.505058	3.452639	10.600000	18.700000	18.700000
0.743548	4698.000000	6.56957	467.784884	3.215953	3.870000	8.500000	10.400000
0.798749	4906.000000	5.75855	467.932750	3.318452	3.150000	8.400000	8.500000
0.827279	5396.000000	3.74724	467.916853	3.556172	0.950000	7.700000	6.700000
0.800386	5443.000000	3.52822	467.864544	3.572583	0.950000	5.100000	6.100000
0.565083	5707.000000	2.43247	461.190014	2.474941	0.060000	3.910000	6.700000
0.387575	5960.000000	2.00065	461.190014	1.841274	-2.630000	3.100000	2.820000

c) in fase calante

1.366676	0.000000	34.46752	300.028727	4.658910	32.891800	39.000000	39.000000
0.833563	285.000000	31.64810	300.464251	3.690817	29.039200	33.260000	32.990000
1.074158	740.000000	28.83599	300.690984	3.997747	25.770000	30.650000	33.220000
1.029876	905.000000	27.47281	300.800250	3.887800	25.520000	29.570000	32.290000
0.736839	963.000000	27.21181	301.038325	3.517382	23.100000	29.700000	32.040000
1.094205	1410.000000	24.78940	301.299975	3.929932	22.980000	26.780000	26.770000
0.852528	1715.000000	22.57045	301.683773	3.398707	20.080000	24.020000	25.500000
0.892213	2288.000000	19.30204	302.015882	3.295256	17.400000	22.900000	20.930000
0.947459	2498.000000	18.23489	302.169988	3.750248	16.070000	19.600000	19.820000
0.826201	2626.000000	17.32708	302.298200	3.023742	15.800000	22.580000	19.010000
0.729139	2766.000000	16.77454	302.491722	3.154622	14.590000	17.750000	19.460000
1.055598	3036.000000	15.44905	302.661228	3.336136	13.950000	17.080000	18.990000
0.944211	3211.000000	13.75221	302.865031	2.791096	12.450000	18.140000	18.510000
0.863555	3493.000000	12.04011	303.688439	2.938411	10.600000	18.700000	18.700000
0.707580	4698.000000	6.14127	304.437499	2.706765	3.870000	8.500000	10.400000
0.770255	4906.000000	5.35242	304.780093	2.828449	3.150000	8.400000	8.500000
0.805416	5396.000000	3.28518	305.064708	3.023052	0.950000	7.700000	6.700000
0.708068	5443.000000	3.07182	305.216781	2.804781	0.950000	5.100000	6.100000
0.409741	5707.000000	2.22191	305.330104	1.698238	0.060000	3.910000	6.700000
0.256582	5960.000000	2.00074	305.330104	1.218966	-2.630000	3.100000	2.820000
*** { 6, 20 } tempo 97801.655594							
1.367544	0.000000	34.46335	298.642014	4.654524	32.891800	39.000000	39.000000
0.833264	285.000000	31.64046	299.076199	3.686159	29.039200	33.260000	32.990000
1.073362	740.000000	28.83174	299.302290	3.993236	25.770000	30.650000	33.220000



1.030443	905.000000	27.46662	299.411159	3.882584	25.520000	29.570000	32.290000
0.736297	963.000000	27.20555	299.648750	3.511241	23.100000	29.700000	32.040000
1.093866	1410.000000	24.78530	299.909444	3.923531	22.980000	26.780000	26.770000
0.852079	1715.000000	22.56579	300.291402	3.393018	20.080000	24.020000	25.500000
0.891985	2288.000000	19.29786	300.622087	3.289811	17.400000	22.900000	20.930000
0.947437	2498.000000	18.23022	300.775579	3.745153	16.070000	19.600000	19.820000
0.825608	2626.000000	17.32212	300.903342	3.018351	15.800000	22.580000	19.010000
0.728353	2766.000000	16.77007	301.096312	3.147901	14.590000	17.750000	19.460000
1.054928	3036.000000	15.44625	301.265291	3.330287	13.950000	17.080000	18.990000
0.944004	3211.000000	13.74959	301.468468	2.786529	12.450000	18.140000	18.510000
0.863299	3493.000000	12.03654	302.289719	2.933299	10.600000	18.700000	18.700000
0.707186	4698.000000	6.13723	303.036454	2.701684	3.870000	8.500000	10.400000
0.769941	4906.000000	5.34864	303.377786	2.823587	3.150000	8.400000	8.500000
0.805250	5396.000000	3.28077	303.661426	3.017907	0.950000	7.700000	6.700000
0.707063	5443.000000	3.06740	303.813013	2.797121	0.950000	5.100000	6.100000
0.408176	5707.000000	2.22017	303.925471	1.690935	0.060000	3.910000	6.700000
0.255402	5960.000000	2.00074	303.925471	1.213358	-2.630000	3.100000	2.820000
*** { 6, 20} tempo 98101.235573							
1.368413	0.000000	34.45919	297.260310	4.650141	32.891800	39.000000	39.000000
0.832966	285.000000	31.63282	297.693182	3.681502	29.039200	33.260000	32.990000
1.072563	740.000000	28.82748	297.918648	3.988722	25.770000	30.650000	33.220000
1.031012	905.000000	27.46045	298.027070	3.877368	25.520000	29.570000	32.290000
0.735755	963.000000	27.19931	298.264013	3.505104	23.100000	29.700000	32.040000
1.093527	1410.000000	24.78122	298.523776	3.917133	22.980000	26.780000	26.770000
0.851630	1715.000000	22.56113	298.904923	3.387336	20.080000	24.020000	25.500000
0.891757	2288.000000	19.29370	299.234695	3.284375	17.400000	22.900000	20.930000
0.947415	2498.000000	18.22555	299.387708	3.740066	16.070000	19.600000	19.820000
0.825015	2626.000000	17.31717	299.515056	3.012969	15.800000	22.580000	19.010000
0.727568	2766.000000	16.76560	299.707384	3.141195	14.590000	17.750000	19.460000
1.054258	3036.000000	15.44346	299.875800	3.324445	13.950000	17.080000	18.990000
0.943795	3211.000000	13.74699	300.077907	2.781967	12.450000	18.140000	18.510000
0.863041	3493.000000	12.03297	300.895986	2.928189	10.600000	18.700000	18.700000
0.706790	4698.000000	6.13319	301.640690	2.696608	3.870000	8.500000	10.400000
0.769626	4906.000000	5.34488	301.981019	2.818731	3.150000	8.400000	8.500000
0.805084	5396.000000	3.27636	302.263873	3.012772	0.950000	7.700000	6.700000
0.706056	5443.000000	3.06300	302.415074	2.789469	0.950000	5.100000	6.100000
0.406614	5707.000000	2.21845	302.526766	1.683656	0.060000	3.910000	6.700000
0.254226	5960.000000	2.00074	302.526766	1.207774	-2.630000	3.100000	2.820000



BIBLIOGRAFIA

- 1] AA VV (1991), *Opportunities in the hydrologic sciences*, National Academy press, Washington, USA,.
- 2] Beven, K. J. (1984). "Infiltration into a class of vertically non-uniform soils" *Hydrol. Sci. J.*, 29 (4), 425-434.
- 3] Beven, K. J. e M.J. Kirkby. (1979). "A physically based variable contributing area model of basin hydrology", *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1), 43-49.
- 4] Costa-Cabral, M. C. et al. (1992). "A kinematic model of infiltration and runoff generation in a layered and sloped soils", *Adv. Water Resour.*, 15, 311-324.
- 5] Dallago N.(1993), "Sviluppo di un modello di idrodinamica fluviale ed applicazione al fiume Adige", Tesi di laurea, Università degli Studi di Trento, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali.
- 6] De Marsily G.(1986), *Quantitative hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers*, Academic Press,.
- 7] Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (1997), "Modello matematico generale del fiume Adige", Università degli Studi di Trento.
- 8] Dunne, T. (1978). "Field studies in hillslope flow processes". In: M.J. Kirkby (editore) *Hillslope Hydrology*, John Wiley, New York, 227-294.
- 9] Dunne, T., e R.D. Black. (1970a). "An experimental investigation of runoff production in permeable soils", *Water Resour. Res.*, 6(2), 478-490.
- 10] Dunne, T., e R.D. Black. (1970b). "Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed", *Water Resour. Res.*, 6(5), 1296-1311.
- 11] Ferrari L. e Versace C. (1994), "Studio idraulico, idrologico e mappatura delle aree inondabili, per la stesura del piano di protezione civile del torrente Letimbro (SV)", Tesi di



laurea, Università degli studi di Genova, Facoltà di Ingegneria.

- 12] Foufoula-Georgiou E. (1994), *The state of art of rain fall analysys*, AGU.
- 13] Freeze R. A. e Cherry J. A. (1979), *Groundwater*, Prentice Hall, Englewoods Cliffs, NJ.
- 14] Freeze, R. A. (1972a). "Role of subsurface flow in generating surface runoff, 1, Base flow contributions to channel flow", *Water Resour. Res.*, 8(3), 609-623.
- 15] Freeze, R. A. (1972b) "Role of subsurface flow in generating surface runoff, 2, Upstream source areas", *Water Resour. Res.*, 8(5), 1272-1283.
- 16] Freeze, R. A. (1974), "Streamflow generation", *Rev. Geophys. and Space Phys.*, 12(4), 627-647.
- 17] Heimsath, A. M. et al. (1997). "The soil production function and landscape equilibrium", *Nature*, 388, 358-361.
- 18] Hewlett, J. D. (1974). "Comments on letters relating to 'Role of subsurface flow in generating surface runoff', by R. Allan Freeze", *Water Resour. Res.*, 10(3), 605-608.
- 19] Horton, R. E. (1933). "The role of infiltration in the hydrologic cycle", *Eos Trans. AGU*, 14, 446-460.
- 20] Kirkby, M. (1988) "Hillslope runoff processes and models", *J. Hydrol.*, 100, 315-339.
- 21] Kirkby, M. J. (1978). *Hillslope Hydrology*, Wiley, New-York.
- 22] Kopp S. M., (1996) "Linking GIS and hydrological models: where we have been, where we are going?", in K. Kovar e H.P. Nachtnebel (editori) *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, IAHS Publication, UK, 133-139.
- 23] Moisello (1992), *Idrologia tecnica*, La Goliardica Pavese.
- 24] Montgomery, D. R., e W. E. Dietrich. (1995). "Hydrologic processes in a low-gradient source area", *Water Resour. Res.*, 31(1), 1-10.
- 25] Moser M. (1994), "Criteri per la determinazione delle fasce di pertinenza fluviale: applicazione ad un tratto del fiume Brenta", Tesi di laurea, Università degli Studi di Trento, Facoltà di Ingegneria.
- 26] Nemec J. (1994), "Distributed hydrological models in the perspective of forecasting operational real time hydrological systems (forth)", in Rosso R. et al. (editori) *Advances in Distributed Hydrology*, Water Resources Publications, Chelsea, USA, 69-83.
- 27] Philip, J. R. (1969). "The theory of infiltration", *Adv. Hydrosci.*, 5, 215-296.
- 28] Philip, J. R. (1991). "Hillslope infiltration: planar slopes", *Water Resour. Res.*, 27(1), 109-117.
- 29] Philip, J. R. et al. (1989). "Unsaturated seepage and subterranean holes: Conspectus and exclusion problem for a circular cylindrical cavities", *Water Resour. Res.*, 25, 16-28.



- 30] Porporato A. e Ridolfi L. (1998), "*Predizione lineare multivariata e sua applicazione agli eventi di piena*", XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Catania.
- 31] Press W. H. et al., *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*.
- 32] Regione Liguria, Genio Civile di Imperia (1984), "*Piano di bacino del torrente Nervia*".
- 33] Richards, L. A., (1931). "*Capillary conduction of fluids through porous mediums*", J. Phys., 1, 318-333.
- 34] Rigon, R., et al.(1996)., "*Metodi geomorfologici di inferenza della risposta idrologica*", XXV Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche, Torino.
- 35] Rinaldo, A. e I. Rodriguez-Iturbe. (1997). "*Geomorphological Theory of Hydrologic response*", Hydrological Processes, XXXXX
- 36] Rinaldo, A., et al.. (1991). "*Geomorphological dispersion*", Water Resour. Res., 27(4), 513-525.
- 37] Rodriguez-Iturbe, I. e J. B. Valdes. (1979). "*The geomorphic structure of hydrologic response*", Water Resour. Res., 18(4), 877-886.
- 38] Saibanti S. (1994), "*Un modello matematico di qualità delle acque: applicazione al fiume Adige*", Tesi di laurea, Università degli Studi di Trento, Facoltà di Ingegneria.
- 39] Schultz G. A. (1996), "*Remote sensing and GIS from the perspective of hydrological systems and process dynamics*", in K.Kovar e H.P. Nachtnebel (editori) *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, IAHS Publication, UK,637-647.
- 40] Trentini M. (1996), "*L'uso di sistemi informativi territoriali nella pianificazione di bacino con applicazione al bacino del torrente Leno*", Tesi di laurea, Università degli Studi di Trento, Facoltà di Ingegneria.
- 41] Verardo P.(1997), "*L'evapotraspirazione nei bacini montani: modellazione numerica e applicazione ad un caso di studio*", Tesi di laurea, Università degli Studi di Trento, Facoltà di Ingegneria.



*Desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro:
il Dott. Riccardo mio relatore e il Riccardo amico e compagno di appartamento;
Lorenzo, Ruggero, Paolo, Nicola, Matteo e Angelo per i consigli e l'aiuto sempre sincero;
l'Ing. Cesare Cigna per il contributo durante la fase di raccolta dei dati;
la famiglia che mi ha sempre dato sostegno e serenità
e Monica.*

Su alcuni metodi per la prevenzione e previsione del rischio idraulico

