



Consiglio Nazionale delle Ricerche

*IEIIT - Istituto di Elettronica e di Ingegneria dell'Informazione e delle
Telecomunicazioni - Sezione di Bologna - Università di Bologna*

**GENERAZIONE DELLE LINEE D'IMPLUVIO E DI
DISPLUVIO E CALCOLO DEI PARAMETRI MORFOLOGICI
DEI SOTTOBACINI ELEMENTARI APPARTENENTI AL
TERRITORIO COLLINARE-MONTANO DELLA
REGIONE LOMBARDIA**

ALBERTO CARRARA

***CNR-IEIIT, Viale Risorgimento, 2, 40136 Bologna
Tel. +39-051-2093551, Fax +39-051-2093540***

Bologna, 20.11.2004

SOMMARIO

Per il territorio collinare-montuoso della Regione Lombardia, di superficie complessiva pari a 12780 Km², è stato generato automaticamente un reticolo pienamente connesso e ordinato delle linee di drenaggio e dei relativi spartiacque, nonché calcolati i principali parametri idro-morfologici di ciascun sottobacino ed emi-sottobacino (versante principale) elementare in cui l'area in esame è stata suddivisa.

Tale elaborato cartografico è stato ottenuto a mezzo di un codice di calcolo che utilizza, come dati d'ingresso, un modello digitale del terreno (DTM) ed un reticolo idrografico ("blue-lines") digitalizzato, ambedue derivati dalla carta tecnica della Regione Lombardia. Il primo permette l'identificazione delle linee di impluvio e di displuvio nelle aree collinari/montuose. Il secondo integra l'informazione del dato altimetrico (DTM) nelle aree pianeggianti prive di una caratterizzazione morfologica adeguata.

Tutte le cartografie realizzate sono state quindi convertite in coverage ArcInfo per una loro semplice integrazione con gli archivi cartografici della Regione.

1. PREMESSA

Nella primavera del 2002 furono presi accordi con la Struttura Sistema Informativo Territoriale, Direzione Generale Territorio e Urbanistica, della Regione Lombardia per la realizzazione di una cartografia sperimentale della ripartizione automatica - a partire da un modello digitale del terreno e da un reticolo idrografico digitale - in sottobacini ed emi-sottobacini elementari del territorio della Valtellina, intesa quale area pilota dell'intero territorio collinare e montano regionale.

Il progetto, completato nel febbraio del 2003, ha portato all'individuazione automatica delle linee d'impluvio e di displuvio dell'area di studio (quasi 3300 Km²), alla suddivisione della stessa in 3383 sottobacini elementari e 6726 emi-sottobacini (versanti principali) e al calcolo dei principali parametri idro-morfologici di ciascun sottobacino e versante principale.

Nel marzo del corrente anno, sempre con la Struttura Sistema Informativo Territoriale, si è convenuto di estendere la realizzazione di tale tipo di cartografie idro-morfologiche all'intero territorio collinare e montuoso della Regione.

Per l'intera area alpina (12050 Km²; Fig. 1) e per il settore appenninico dell'Oltrepò pavese (732 Km²; Fig. 1), sono state quindi prodotte le cartografie relative alle linee d'impluvio, displuvio, dei sottobacini e emi-sottobacini elementari, nonché calcolati i parametri idro-morfologici di bacino e di versante, utilizzando un diverso grado di risoluzione spaziale.

La vastità e la complessità idro-morfologica dell'area di studio hanno richiesto la risoluzione di molteplici problemi inerenti sia l'ottimizzazione del codice di calcolo, che il potenziamento delle risorse hardware. Nonostante tali difficoltà, le cartografie ottenute, di seguito descritte, possono considerarsi come il prodotto più innovativo ed avanzato nel settore, mai realizzato in ambiente accademico e di sviluppo.

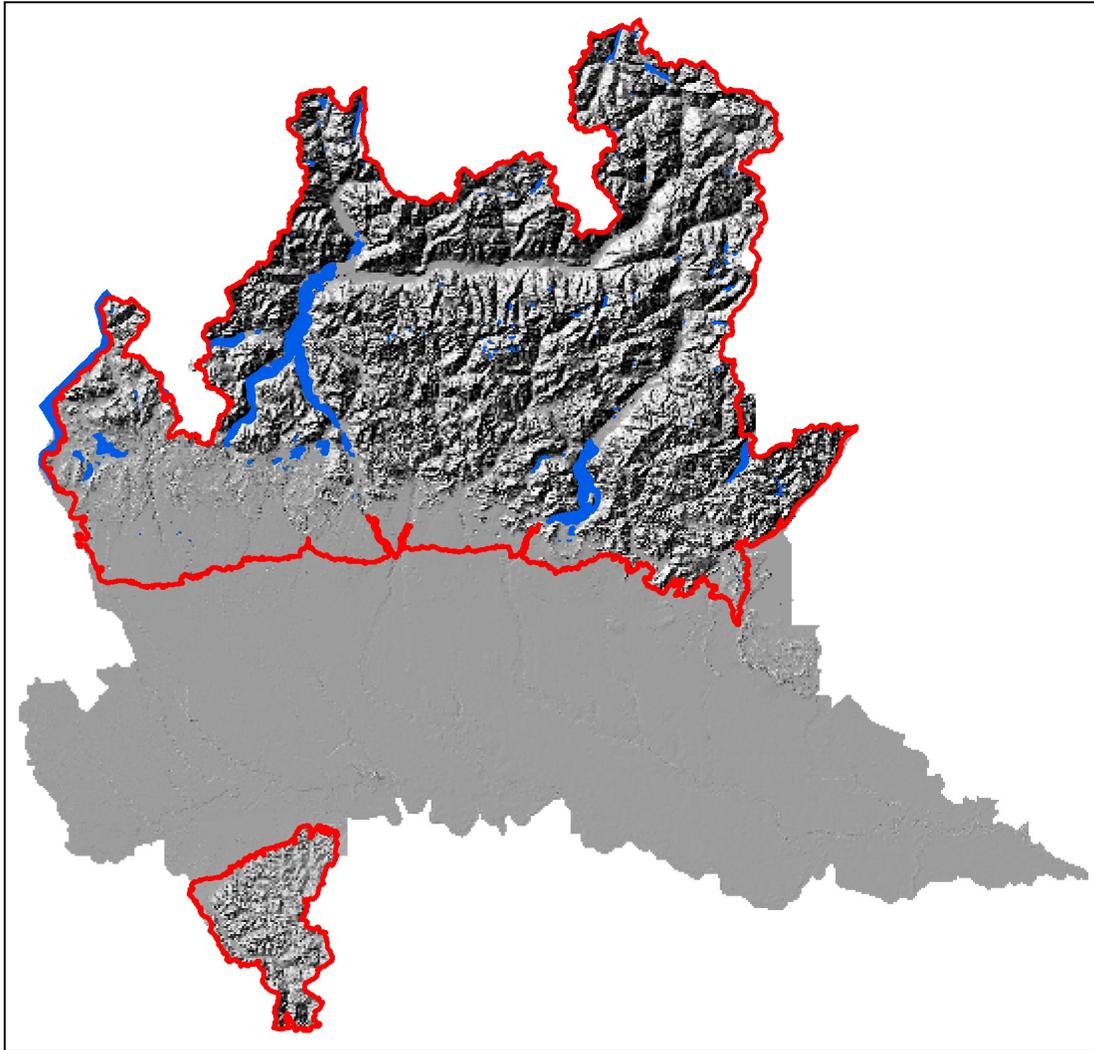


Fig. 1. Perimetrazione (in rosso) delle aree di studio corrispondenti, a nord, al territorio collinare-montuoso alpino (superficie pari a 12050 Km²) e, a sud, al settore appenninico dell'Oltrepò pavese (superficie pari a 732 Km²). *Shaded-relief* del territorio regionale derivato dal modello digitale del terreno (DTM), con passo di campionamento pari a 20x20, realizzato dalla Regione Lombardia. Aree lacustri in blu.

2. STUDI PRECEDENTI

L'individuazione automatica delle linee d'impiuvio e di dispiuvio di un bacino idrografico, a partire da un modello digitale del terreno (DTM), è stata oggetto di studio sin dalla fine degli anni settanta (Puecher & Douglas, 1975; Beven & Kirkby, 1979). Tuttavia, solo in tempi più recenti si sono moltiplicati i tentativi in tale direzione (Jarvis, 1984; Marks et al., 1984; Band, 1986; Palacios-Velez & Cuevas-Renaud, 1986; Jenson et al., 1988; Carrara, 1988; Carrara et al., 1988; Jenson, 1991; Tarboton et al., 1991, 1992; Dietrich et al., 1993; Montgomery et al., 1993).

Le cause di questa crescente attenzione per l'argomento vanno ricercate in due ordini di fattori. Il primo è connesso al fatto che solo di recente gli organi cartografici di vari paesi hanno reso disponibili in forma digitale i dati altimetrici (curve di livello, DTM di tipo "raster", TIN, ecc.) relativi alle coperture cartografiche dei rispettivi territori nazionali. Il secondo si riferisce ad un sempre più diffuso interesse per lo sviluppo e l'applicazione della cartografia numerica da parte degli enti preposti alla gestione del territorio: interesse vuoi per lo sviluppo di metodologie automatizzate intese alla risoluzione di svariati problemi geomorfologici ed idrologici, vuoi per la creazione di basi di dati geografici necessari alla valutazione delle risorse e dei vincoli ambientali. A riguardo, basterà ricordare come, alla luce degli studi pionieristici di Horthn (1945), ripresi ed approfonditi da numerosi studiosi (Strahler, 1952; Shreve, 1966; ecc.), gran parte della modellistica idrologica dei bacini fluviali sia da tempo basata sulla determinazione dei parametri morfologici del reticolo idrografico (gerarchia, lunghezza, pendenza delle aste, ecc.) e dei rispettivi sottobacini sottesi (superficie, perimetro, frequenza, densità di drenaggio, ecc.). Tali parametri infatti trovano applicazione tanto nella determinazione delle risorse idriche ed idro-energetiche di un bacino, quanto nella valutazione del rischio idraulico (piene, esondazioni, trasporto solido, ecc.).

Parimenti, la suddivisione di un bacino nei suoi sottobacini elementari e versanti principali costituisce il punto di partenza per molteplici studi di geomorfologia applicata, fra cui quelli sulla valutazione, tramite modelli multivariati, della pericolosità connessa all'instabilità dei versanti rivestono grande rilevanza economico-sociale (Carrara, 1983; Carrara et al., 1995).

Tradizionalmente, il calcolo dei parametri morfologici del reticolo idrografico viene effettuato misurando o digitalizzando la rete idrografica riportata sulle basi topografiche: operazione questa, come è noto, assai lunga e non priva di errori. Il numero di aste ("*blue-lines*") presenti sul documento cartografico è infatti funzione, oltre che della scala, dei criteri adottati dal topografo e dal disegnatore nel preparare l'elaborato in questione. Talché, per studi di dettaglio è sempre consigliabile integrare i dati cartografici con quelli ottenuti dall'osservazione della foto aerea; mentre per bacini di vaste dimensioni il reticolo idrografico viene spesso determinato prolungando le "*blue-lines*" lungo le morfologie vallive evidenziate dall'andamento delle curve di livello (Zavoianu, 1985).

Ancora più complessa risulta la determinazione delle linee di dispiuvio e la conseguente perimetrazione di ogni sottobacino. Tanto che pochi sono gli studi geomorfologici ed idrologici nei quali siano stati presi in considerazione i parametri

morfologici connessi alla superficie e alla forma dei sottobacini elementari.

Alla luce di quanto sopra, appare evidente l'importanza, a fini teorici ed applicativi, di poter individuare automaticamente il reticolo idrografico e gli spartiacque e, quindi, suddividere l'area di un bacino nei suoi sottobacini o emi-sottobacini (*versanti principali*) elementari, ciascuno corredato dei principali parametri morfologici (superficie, perimetro, pendenza, esposizione, ecc.), partendo da un DTM.

Nel corso degli ultimi anni, è stato sviluppato un insieme di procedure per la realizzazione ed applicazione di cartografie digitali alla geomorfologia e all'idrologia. In particolare, è stata messa a punto una procedura che, a partire da un DTM *raster*, è in grado di individuare le linee di impluvio e di displuvio, suddividere l'area di un bacino in sottobacini elementari e calcolare i parametri morfologici di ciascuno di essi. Sono state altresì sviluppate tecniche per integrare i dati altimetrici di un DTM con quelli idrografici al fine di rendere applicabile la procedura in questione anche ad aree pianeggianti, per le quali la morfologia fluviale non è adeguatamente espressa dall'andamento del rilievo (Carrara, 1988; Carrara et al., 1988; Carrara et al., 1995).

3. ESTRAZIONE DEL RETICOLO DEGLI IMPLUVI E DEI DISPLUVI E DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI MORFOLOGICI DI BACINO

3.1. - Caratteristiche ed Organizzazione dei Dati d'Ingresso

Alla luce di quanto precedentemente ricordato, a seconda della zona da investigare, i dati digitali di "input" per l'identificazione automatica del reticolo idrografico, dei limiti di bacino-sottobacino e dei relativi parametri morfologici-idrologici potranno essere costituiti:

- a) dai soli dati altimetrici (DTM "*raster*");
- b) dai dati altimetrici e da quelli idrografici ("*blue-lines*").

È parso di interesse teorico ed applicativo, quindi, sviluppare un insieme di procedure in grado di operare sia utilizzando i soli dati altimetrici, sia integrando l'informazione del rilievo con quella del reticolo idrografico. Utilizzando queste due sorgenti di dati, è quindi possibile ottenere:

- a) la generazione di un reticolo pienamente connesso e gerarchicamente ordinato delle linee di drenaggio e dei relativi spartiacque, basata esclusivamente sull'andamento del rilievo (DTM *raster*) dell'area in esame, da cui ricavare la suddivisione dell'area in sottobacini elementari, e i principali parametri morfologici del reticolo e di ciascun sottobacino;
- b) è altresì possibile generare, su base esclusivamente morfologica, il reticolo per quelle porzioni di un bacino a forte rilievo e di integrare il dato orografico con quello delle "*blue-lines*" per le parti pianeggianti, generalmente prossime alla foce, del sistema fluviale.

Circa la struttura dei dati, si è convenuto di effettuare tutte le elaborazioni su dati organizzati in forma matriciale (*raster*). Senza entrare nel merito di tale scelta, i cui pregi e difetti sono stati già ampiamente dibattuti nella letteratura riguardante la cartografia numerica e, più in generale, i sistemi informativi geografici, basterà qui sottolineare la maggiore semplicità di manipolazione ed elaborazione che tale tipo di struttura offre rispetto a quella vettoriale (continua).

Pertanto, quando i dati altimetrici sono in forma di curve di livello digitalizzate (struttura poligonale-vettoriale), è necessaria la loro conversione in un DTM *raster*.

Parimenti, il reticolo idrografico, comunemente digitalizzato in continuo, deve essere convertito in un *raster* con passo di campionamento pari a quello del corrispondente DTM. Benché sul mercato software siano disponibili diverse procedure di conversione *vector-raster*, anche per tale operazione è stata messa a punto una tecnica specifica. Come più oltre illustrato, questa prevede preliminarmente l'ordinamento gerarchico (secondo Strahler) dei rami del reticolo e quindi la loro "rasterizzazione" procedendo dai rami d'ordine più elevato a quelli d'ordine inferiore. In tal modo viene garantita la connessione dei rami più importanti del reticolo, preservata l'integrità topologica del medesimo, nonché stabilito un criterio gerarchico per l'eliminazione o spostamento dei punti, appartenenti a rami diversi del reticolo, che risultino ricadere in una stessa cella del *raster*.

In conclusione, i dati d'input saranno costituiti da una matrice di quote (DTM) dell'area in esame ed eventualmente da una matrice del reticolo idrografico, rasterizzato con passo di campionamento uguale a quello del DTM.

Si precisa che nel presente rapporto la terminologia relativa ai reticoli idrografici farà riferimento a quella di Shrieve (1966, 1967), Jarvis (1984) e Zavoianu (1985). Un reticolo idrografico è infatti interpretabile come un grafo orientato con radice corrispondente al nodo di foce. L'insieme dei nodi è composto dalle confluenze (nodi interni) e dalle sorgenti (nodi esterni). Il tratto fluviale che unisce due nodi viene definito asta ("*link*"), mentre una o più aste contigue formano un ramo di ordine definito dal criterio di gerarchizzazione.

3.1. - Caratteristiche Generali del Software Sviluppato

In Fig. 1 è rappresentato il diagramma di flusso del programma BACINI. Le sigle poste nei riquadri corrispondono ai moduli (tutti scritti in C++) secondo cui si articolano le diverse elaborazioni, mentre le frecce indicano lo sviluppo logico-temporale delle stesse, in relazione ai dati di ingresso e prodotti; in particolare il modulo:

- RAST-1: crea una rete connessa e gerarchizzata delle aste fluviali derivate dalla carta tecnica regionale; converte quindi tale rete vettoriale in una equivalente a struttura "*raster*", preservandone le caratteristiche topologiche e, per quanto possibile, geometriche.
- STEP-0: pre-elabora ("corregge") le quote di un DTM al fine di eliminare tutti i

punti in depressione ("*pits*") tramite algoritmi che si basano o sul solo andamento altimetrico dell'intorno di ciascuna "*pit*" o sull'informazione integrata tra morfologia locale e percorso delle "*blue-lines*" "rasterizzate" .

- STEP-1: determina il percorso e la concentrazione dei deflussi teorici superficiali sulla base della sola morfologia del terreno o integrando il dato altimetrico con quello relativo all'andamento delle "*blue-lines*" .
- STEP-2: ricostruisce un reticolo idrografico pienamente connesso, gerarchizzato e codificato dalla "foce", individua le linee di displuvio di ciascun sottobacino; infine, identifica e codifica le aree di ciascun sottobacino ed emi-sottobacino (versante principale). A tal fine estende le aste di I ordine fino alla linea di displuvio ("sorgente" dell'asta).
- STEP-3: calcola i principali parametri morfologici lineari ed areali del reticolo idrografico e di versanti principali, da cui è possibile derivare numerosi altri parametri a mezzo di semplici operazioni matematiche.
- STEP-4: converte in vettoriale la struttura *raster* dei dati e genera le tabelle dei parametri morfologici in formato ASCII.

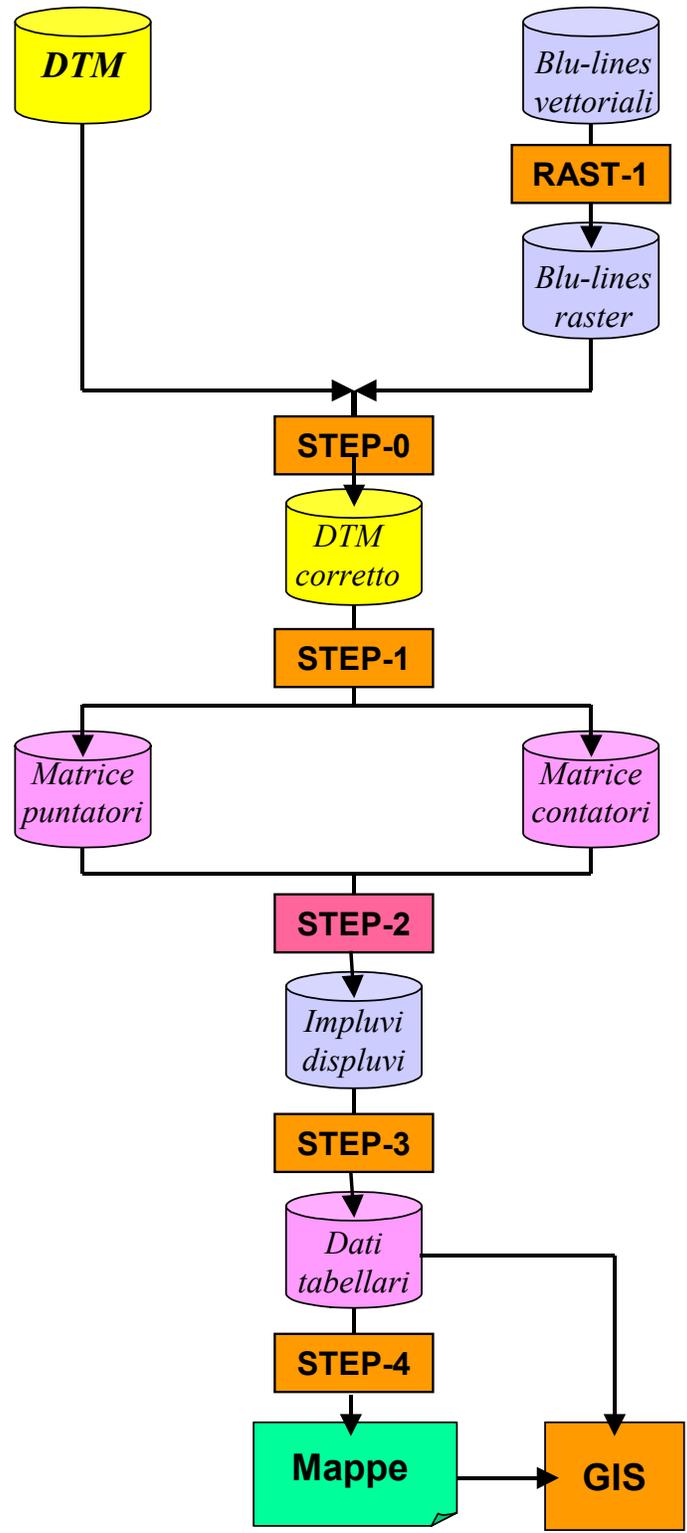


Fig. 1. Diagramma di flusso del programma BACINI.

4. LE CARTOGRAFIE REALIZZATE

Come enunciato in Premessa, la procedura per l'estrazione del reticolo idrografico e degli spartiacque è stata impiegata nel territorio collinare-montuoso della Regione (Fig. 1). Per ovvie motivazioni di efficienza, i settori alpino e appenninico sono stati elaborati separatamente con la conseguente produzione di due distinti insiemi di elaborati cartografici.

Come sopra ricordato, per tutte e due le aree, i dati di ingresso sono stati il modello digitale del terreno (DTM), con passo di campionamento di 20x20m (Fig. 1), e la rete idrografica digitale (Fig. 1), ambedue derivati dalla carta tecnica regionale e forniti dalla Struttura Sistema Informativo Territoriale della Regione Lombardia.

A mezzo del modulo STEP-0 (descritto in Appendice), sono stati individuati ed corretti oltre 200.000 punti del modello costituenti depressioni (*pit*) chiuse, prive cioè di deflusso delle acque superficiali (Fig. 2). Tali punti hanno una duplice origine: la prima è semplicemente costituita da errori dell'algoritmo di generazione del DTM, la seconda è riferibile ad aree naturalmente (doline, laghi, ecc.) o artificialmente (invasi, scavi, ecc.) depresse. A prescindere dalla loro origine, dette depressioni devono essere necessariamente eliminate al fine di permettere il corretto funzionamento di qualsiasi algoritmo di generazione della rete degli impluvi e displuvi.

Il reticolo idrografico ottenuto per digitalizzazione è stato corretto eliminando tutte le interruzioni e incongruenze (Fig. 2) a mezzo del modulo RAST-1 e di interventi di *editing* interattivo. Al termine di dette operazioni è stata ottenuta una rete idrografica pienamente connessa ed ordinata (Fig. 3).

Il DTM idrologicamente corretto e la rete drenante rasterizzata sono state quindi utilizzate dai moduli STEP-1 e STEP-2 (descritti in Appendice) per l'identificazione automatica delle linee di impluvio e di displuvio.. E' possibile controllare la densità di drenaggio della rete idrografica generata a mezzo dei tre seguenti parametri del modulo STEP-2:

- area minima contribuente delle aste di I ordine;
- lunghezza minima delle aste di I ordine;
- rapporto tra l'area del bacino di I ordine e la lunghezza della relativa asta.

Il primo parametro di soglia stabilisce quando l'algoritmo di generazione delle aste, che partendo dalla sezione di chiusura del bacino "risale", con tecnica ricorsiva, la matrice dei contatori (vedi Appendice), deve fermarsi. Il secondo elimina le aste di I ordine con lunghezza inferiore alla soglia prefissata. Il terzo elimina le aste di I ordine il cui bacino ha una superficie che non soddisfa il rapporto area/lunghezza dell'asta prefissato. Tutti e tre i parametri controllano in forma diversa il grado di generalizzazione della rete generata e quindi la dimensione media dei sottobacini/versanti principali, in modo analogo a quanto si verifica riportando lo stesso reticolo idrografico su documenti cartografici a scala diversa. Si sottolinea che la dimensione e forma dei bacini d'ordine superiore al I è essenzialmente controllata dalla morfologia generale del territorio.

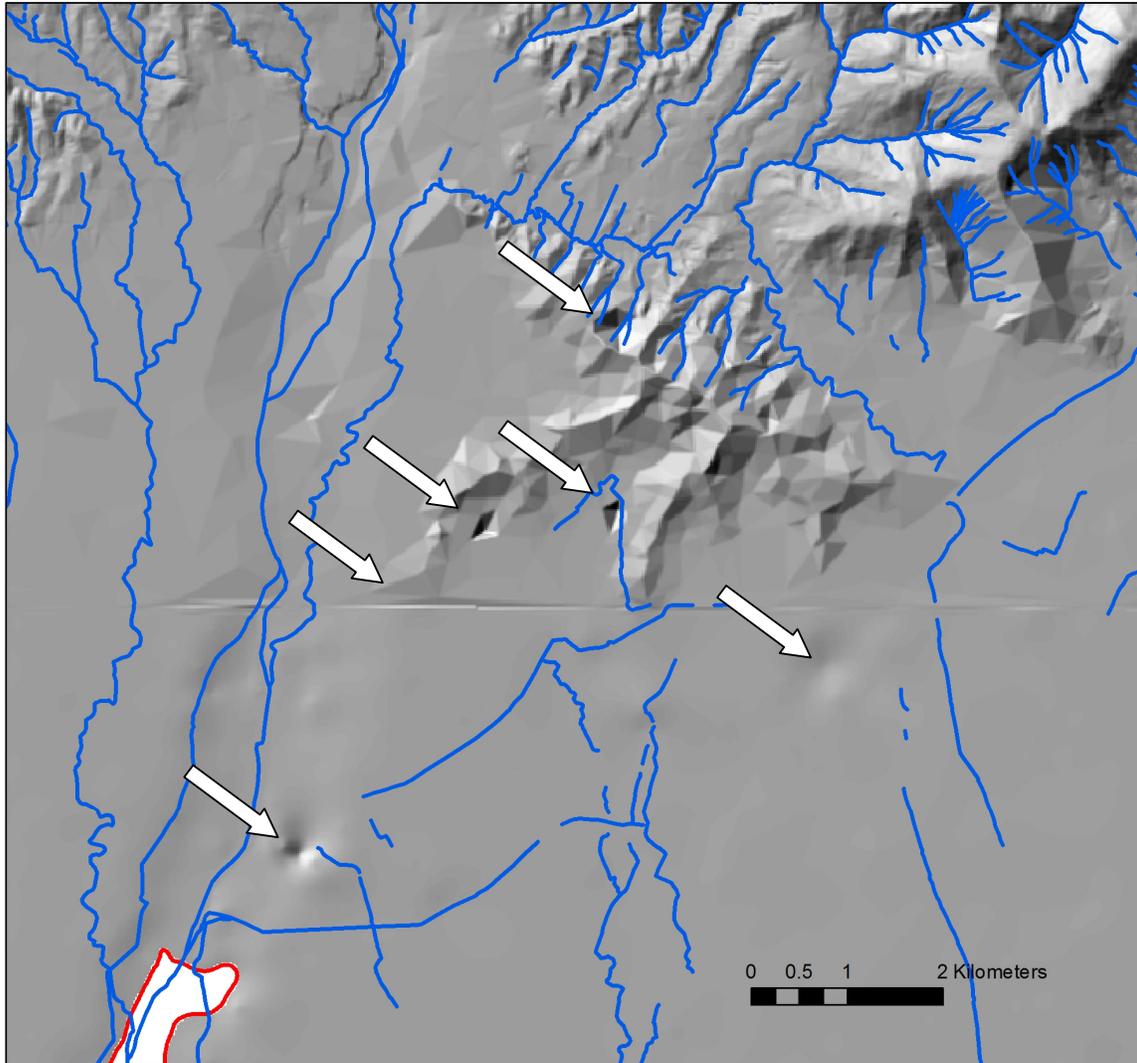


Fig. 2. *Shaded-relief* di una porzione dell'area settentrionale di studio. Esempio di alcuni artefatti (*pit* o discontinuità altimetriche, evidenziati dalle frecce di colore bianco) del DTM che sono stati corretti dal modulo Step-0. In blu la rete drenante derivata dalla carta tecnica regionale, caratterizzata da interruzioni ed incongruenze (punti quadrupli, ecc.).

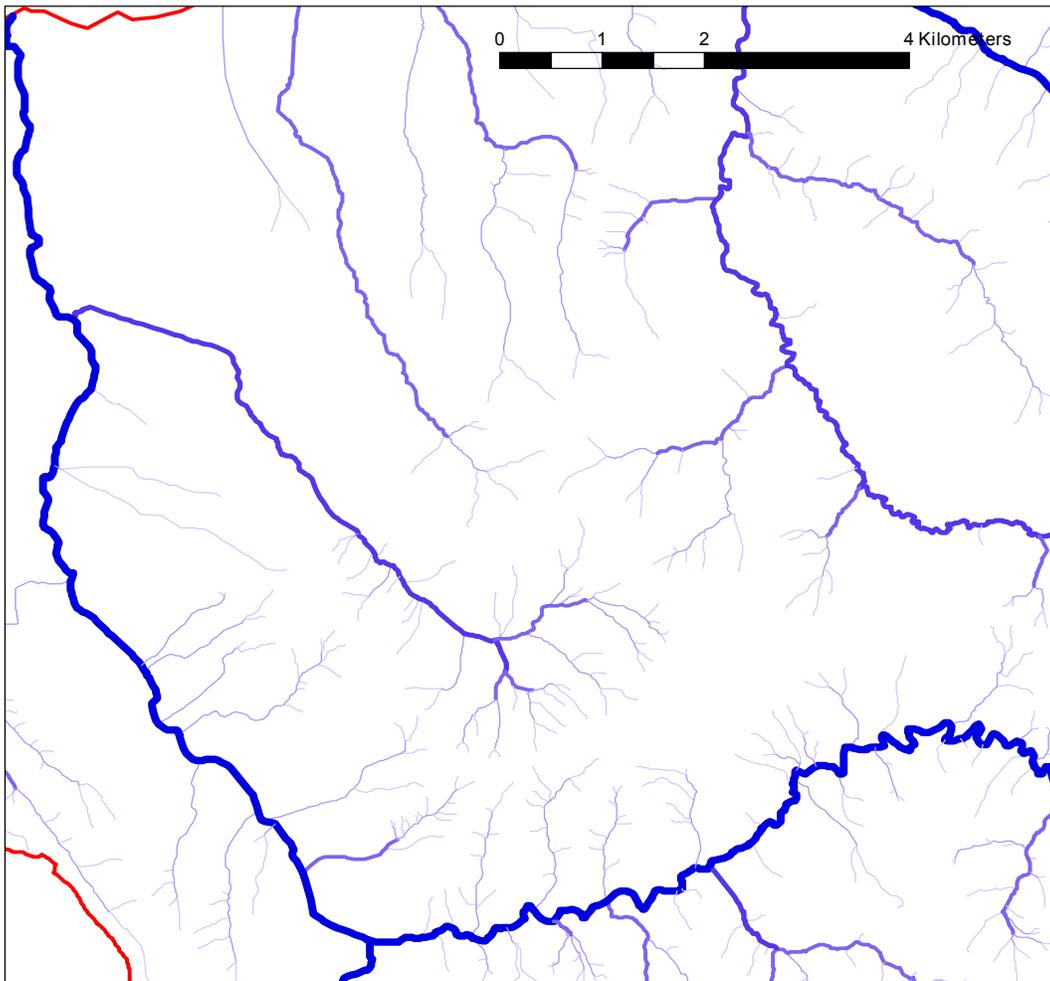


Fig. 3. Porzione del territorio dell'Oltrepò pavese (basso bacino del T. Staffora). Esempio di reticolo idrografico, derivato dalla rete drenante della carta tecnica regionale, pienamente connesso e gerarchizzato a mezzo del modulo RAST-1 e di operazioni di *editing* interattivo.

Tenendo conto che la cartografia in questione deve soddisfare le esigenze di utenti diversi (idraulici, geologi, forestali, agronomi, ecc.), si è ritenuto opportuno assegnare ai parametri sopra elencati valori tali da ottenere una suddivisione del territorio in sottobacini elementari con una superficie *media* prossima al **Km²**. A tale valore si è pervenuti assegnando alle aste di I ordine nel modulo Step-2 un'area minima contribuyente di 30 he. Si è altresì stabilito di generare una seconda suddivisione del territorio in sottobacini utilizzando per le aste di I ordine una soglia minima di **10 Km²**.

A scopo esemplificativo, in Fig. 4 vengono visualizzati i reticoli ottenuti assegnando alle aste di I ordine un'area minima contribuyente, rispettivamente, di 30 he e 10 Km².

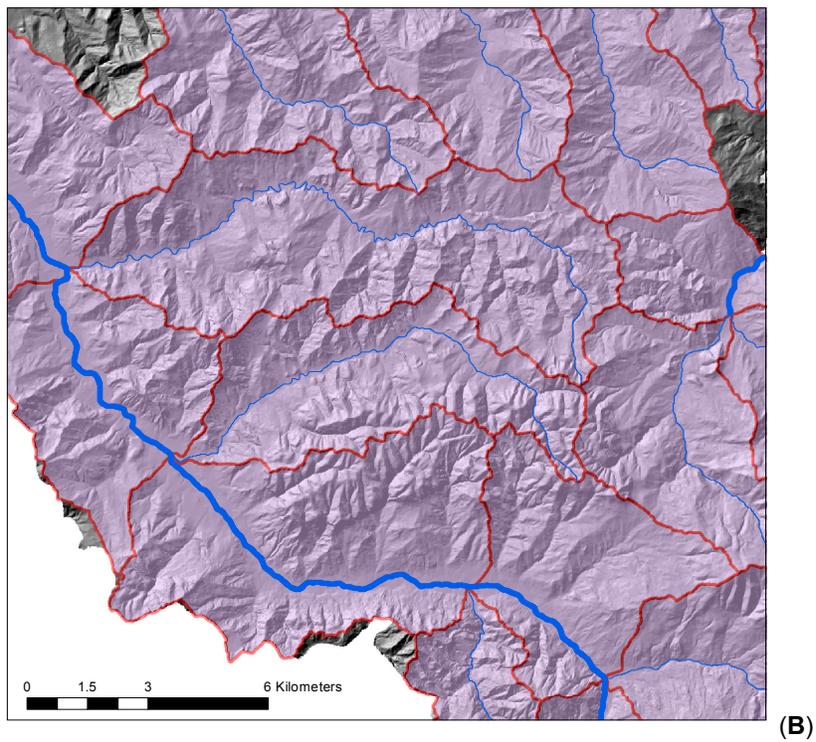
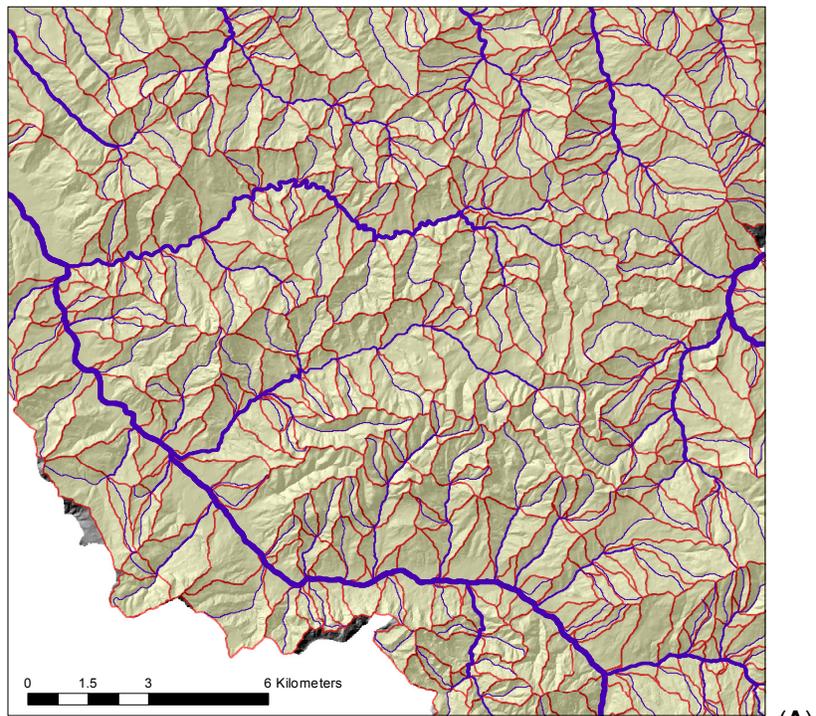


Fig. 4. Porzione del bacino dello Staffora. Ripartizione, a mezzo del modulo STEP-2, del territorio in sottobacini elementari utilizzando per le aste di I ordine un'area minima contribuente pari a 30 he.(A) e a 10 Km² (B)

5. LE COVER ArcInfo

Per ognuno dei due settori collinari-montuosi di studio (alpino e appenninico) del territorio regionale e per ognuno dei due livelli di risoluzione prescelti (aree contribuenti delle aste di I ordine pari a 30 he e a 10 km²), il programma BACINO ha generato un insieme di *layer* informativi e di dati tabellari che sono stati convertiti nelle *cover* ArcInfo elencate in Tav. 1.

Tavola 1. Cover ArcInfo derivate dal programma Bacini, classificate per area di studio e per grado di risoluzione spaziale

Settore Nord (alpino)	Ripartizione del territorio ad alta risoluzione	Ripartizione del territorio a bassa risoluzione
	fiumi30_n	fiumi10k_n
	fiumi30_t_n	fiumi10k_t_n
	bac30_n	bac10k_n
	su30_n	su10k_n
Settore Sud (appenninico)		
	fiumi30_s	fiumi10k_s
	fiumi30_t_s	fiumi10k_t_s
	bac30_s	bac10k_s
	su30_s	su10k_s

Le *cover*, denominate *fiumi30_t_n*, *fiumi10k_t_n*, *fiumi30_t_s* e *fiumi10k_t_s*, costituiscono la rete "sintetica" degli *impluvi* generata dal codice di calcolo (Fig. 5). Ad ogni asta sono associati i parametri idro-morfologici elencati in Tav. 2.

Le *cover*, denominate *fiumi30_n*, *fiumi10k_n*, *fiumi30_s* e *fiumi10k_s*, costituiscono la stessa rete "sintetica" degli *impluvi* generata dal codice di calcolo (Fig. 6), ma con una differenza: le aste di I ordine vengono prolungate fino a raggiungere il punto più prossimo dello spartiacque. Come facilmente intuibile, la creazione di questa seconda rete è scaturita dall'esigenza di suddividere il territorio in emi-bacini elementari (versanti principali) che, per definizione, devono avere una struttura poligonale.

Le *cover*, denominate *bac30_n*, *bac10k_n*, *bac30_s* e *bac10k_s*, costituiscono la rete "sintetica" dei *displuvi* (complementare a quella degli *impluvi*), cioè dei *sottobacini elementari*, sempre generata dal codice di calcolo (Fig. 7). Ad ogni sottobacino elementare sono associati i parametri idro-morfologici elencati in Tav. 3.

Le *cover*, denominate *su30_n*, *su10k_n*, *su30_s* e *su10k_s*, costituiscono la rete "sintetica" dei *dispuvi* e degli *impluvi* (cioè dei *versanti principali*), sempre generati dal codice di calcolo (Fig. 8). Ad ogni versante principale sono associati i parametri idro-morfologici elencati in Tav. 4.

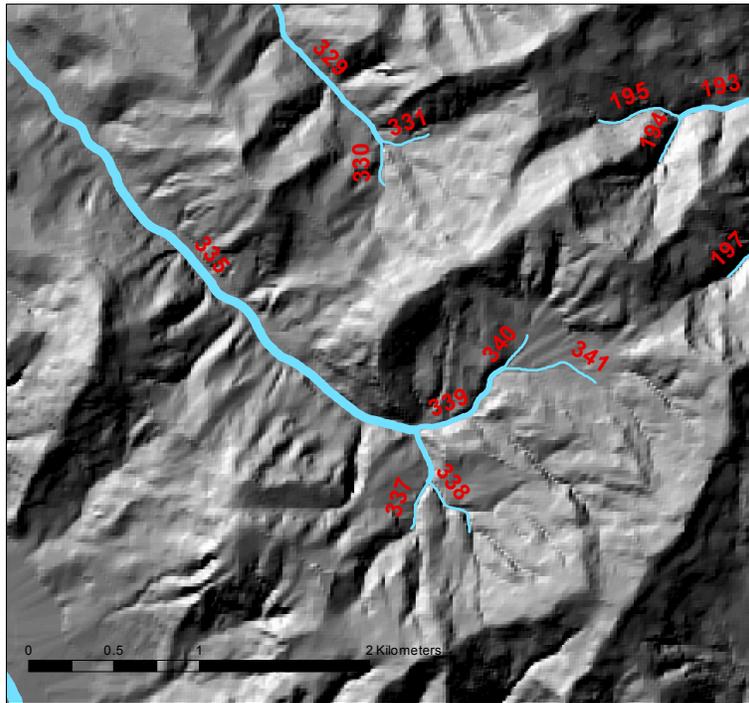


Fig. 5. Rete degli impluvi (in blu) e relativi codici identificatori generata dal programma bacini (porzione della cover *fiumi30_t_s*).

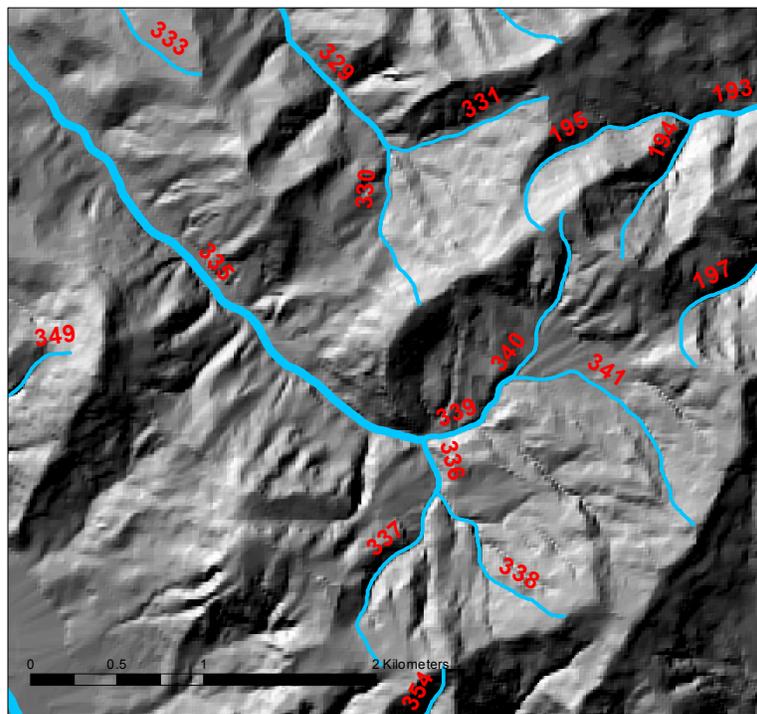


Fig. 6. Rete degli impluvi di Fig. 5 ove le aste di I ordine sono state estese fino a raggiungere i rispettivi spartiacque (porzione della cover *fiumi30_s*).

Vale osservare che, per facilitare tutte l'elaborazioni spaziali e non dei dati da parte degli utilizzatori di queste cartografie, si e' convenuto di assegnare lo stesso codice identificatore alle aste fluviali (variabile CHANNELS-ID, in Tav. 2) e ai bacini elementari (variabile BACINO-ID in Tav. 3), mentre ai versanti principali (variabile VERSANTE-ID in Tav. 4) posti in destra e sinistra idrografica delle aste, è stato dato il codice delle aste e il medesimo incrementato di un fattore che, nel caso in questione, è pari a 30000 (Fig. 5, 6, 7 e 8).

Tavola 2. Elenco dei campi della tabella (.AAT) associata agli elementi lineari (aste fluviali) di cui i primi 8 sono stati automaticamente generati da Arc_GIS (campi 1-8) e i rimanenti (campi 9-22) sono stati prodotti dal programma BACINI.

N.	Variabile	Descrizione
1	FID	Variable interna ArcInfo
2	SHAPE	Variable interna ArcInfo
3	FNODE#	Variable interna ArcInfo
4	TNODE#	Variable interna ArcInfo
5	RPOLY#	Variable interna ArcInfo
6	LPOLY#	Variable interna ArcInfo
7	cover#	Variable interna ArcInfo
8	cover-ID	Variable interna ArcInfo (Identificatore dell'elemento lineare)
9	OUTLET	Codice identificativo della sezione di chiusura del bacino
10	CHANNEL-ID	Codice identificativo della linea di impluvio
11	ORDER_	Ordine (secondo Strahler) dell'impluvio
12	MAGN	Magnetudo (secondo Shrieve) dell'impluvio
13	LNK_ANG	Pendenza media dell'asta (gradi)
14	LINK_LEN	Lunghezza dell'asta (m)
15	TAIL_LEN	Lunghezza del tratto di asta di I ordine compreso tra la sorgente della medesima e la linea di displuvio più prossima (m)
16	AREA_M	Area del sottobacino elementare (m ²)
17	AREAT_K	Area totale drenata dall'asta in corrispondenza del suo nodo di valle (Km ²)
18	L_AREA	Area del emibacino elementare in sinistra idrografica (m ²)
19	R_AREA	Area del emibacino elementare in destra idrografica (m ²)
20	LINK_1	Codice identificativo del primo tributario dell'asta
21	LINK_2	Codice identificativo del secondo tributario dell'asta
22	MX	Identificatore del numero di aste poste a monte di ogni porzione del reticolo

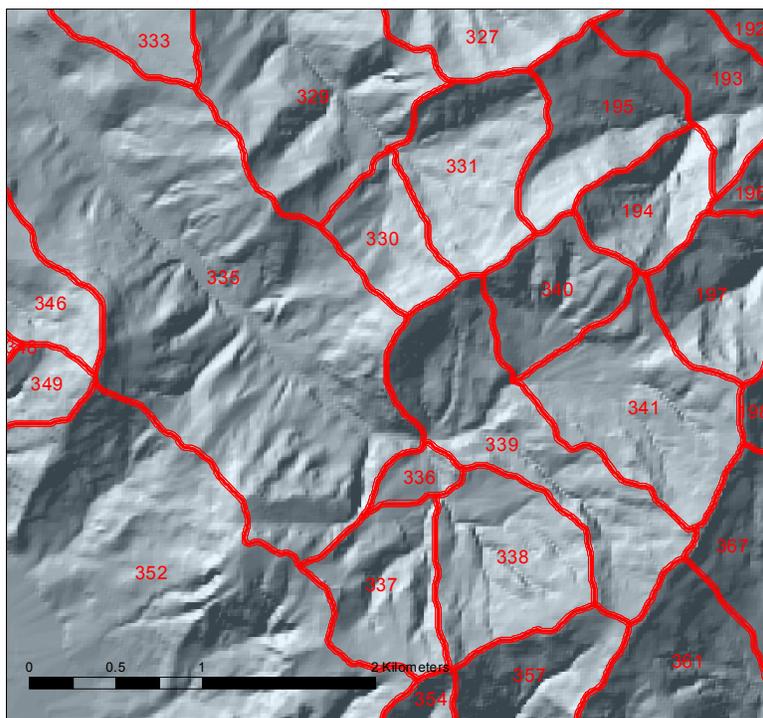


Fig. 7. Ripartizione del territorio in sottobacini elementari, ciascuno con il relativo codice identificativo (porzione della cover *bac30_s*).

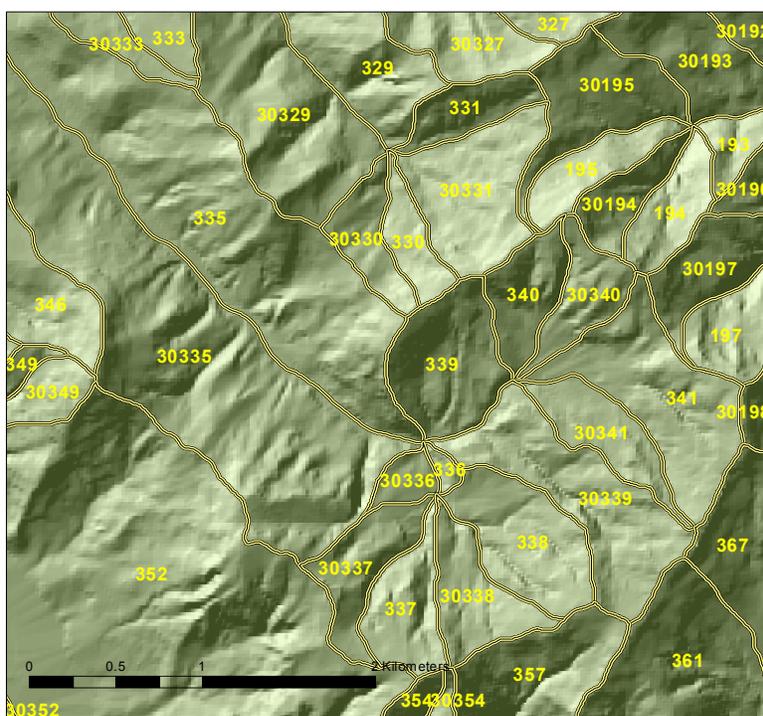


Fig. 8. Ripartizione del territorio in versanti principali (emi-sottobacini elementari), ciascuno con il relativo codice identificativo (porzione della cover *su30_s*).

Tavola 3. Elenco dei campi della tabella (.PAT) associata agli elementi poligonali (**sottobacini elementari**). I primi 6 sono stati automaticamente generati da Arc_GIS (campi 1-6) e i rimanenti sono stati prodotti dal programma BACINI o in ambiente GIS (campi 23-24).

N.	Variabile	DESCRIZIONE
1	FID	Variable interna ArcInfo
2	SHAPE	Variable interna ArcInfo
3	AREA	Variable interna ArcInfo: area (m ²) del poligono (sottobacino elementare)
4	PERIMETER	Variable interna ArcInfo: perimetro (m) del poligono (sottobacino elementare)
5	cover#	Variable interna ArcInfo
6	cover-ID	Variable interna ArcInfo: identificatore dell'elemento poligonale
7	OUTLET	Codice identificativo della sezione di chiusura del bacino
8	BACINO-ID	Codice identificativo del sottobacino elementare
9	ORDER_	Ordine (secondo Strahler) del sottobacino elementare
10	MAGN	Magnitudo (secondo Shrieve) del sottobacino elementare
11	LINK_LEN	Lunghezza dell'asta (m)
12	TAIL_LEN	Lunghezza del tratto di asta di I ordine compreso tra la sorgente della medesima e la linea di displuvio più prossima (m)
13	AREA_M	Area del sottobacino elementare (m ²)
14	AREAT_K	Area totale drenata dall'asta in corrispondenza del suo nodo di valle (km ²)
15	ELV_M	Quota media del sottobacino elementare (m)
16	ELV_MIN	Quota minima del sottobacino elementare (m)
17	ELV_MAX	Quota massima del sottobacino elementare (m)
18	BAC_ANG	Pendenza media del bacino elementare (gradi)
19	LINK_ANG	Pendenza media dell'asta (gradi)
20	DIST_MAX	Distanza (misurata lungo la rete) del punto più lontano dal nodo di valle dell'asta
21	TC	Tempo di corrivazione calcolato secondo Giandotti
22	MX	Identificatore del numero di aste poste a monte di ogni porzione del reticolo
23	LAGO	Identificatore di area lacustre
24	BAC_LAGO	Bacino elementare interessato da un'area lacustre

Tavola 4. Elenco dei campi della tabella (.PAT) associata agli elementi poligonali (**versanti principali**) I primi 6 sono stati automaticamente generati da Arc_GIS (campi 1-6) e i rimanenti sono stati prodotti dal programma BACINI o in ambiente GIS (campi 30-31).

N.	Variabile	DESCRIZIONE
1	FID	Variable interna ArcInfo
2	SHAPE	Variable interna ArcInfo
3	AREA	Variable interna ArcInfo: area (m ²) del poligono (versante principale)
4	PERIMETER	Variable interna ArcInfo: perimetro (m) del poligono (versante principale)
5	cover#	Variable interna ArcInfo
6	cover-ID	Variable interna ArcInfo: identificatore del poligono (versante principale)
7	OUTLET	Codice identificativo della sezione di chiusura del bacino
8	BACINO-ID	Codice identificativo del versante principale. Per i poligoni in destra e sinistra idrografica dell'asta assume, rispettivamente, il valore del codice dell'asta (CHANNELS-ID) e il medesimo incrementato di un fattore pari a 30.000
9	ORDER_	Ordine (secondo Strahler) dell'asta
10	MAGN	Magnitudo (secondo Shrieve) dell'asta
11	LINK_LEN	Lunghezza dell'asta (m)
12	LINK_ANG	Pendenza media dell'asta (gradi)
13	TAIL_LEN	Lunghezza del tratto di asta di I ordine compreso tra la sorgente della medesima e la linea di displuvio più prossima (m)
14	AREA_M	Area del sottobacino elementare (m ²)
15	AREAT_K	Area totale drenata dall'asta in corrispondenza del suo nodo di valle (Km ²)
16	SLO_ARE	Area del versante principale (m ²)
17	ASPECT	Esposizione del versante principale, suddivisa in 8 classi
18	R	Indice di irregolarità morfologica del versante principale
19	ELV_M	Quota media del versante principale (m)
20	ELV_STD	Deviazione standard delle quote nel versante principale (m)
21	ELV_MIN	Quota minima del versante principale (m)
22	ELV_MAX	Quota massima del versante principale (m)
23	SLO_ANG	Pendenza del versante principale (gradi)
24	ANG_STD	Deviazione standard della pendenza del versante principale (gradi)
25	SLO_LEN	Lunghezza media del versante principale (m)
26	LEN_STD	Deviazione standard della lunghezza del versante principale (m)
27	ANG1	Pendenza della parte inferiore del versante principale (gradi)
28	ANG2	Pendenza della parte intermedia del versante principale (gradi)
29	ANG3	Pendenza della parte superiore del versante principale (gradi)
30	MX	Identificatore del numero di aste poste a monte di ogni porzione del reticolo
31	CODEX	Codice identificativo di ogni sottobacino elementare. Assume i valori di BACINO-ID, decrementati del fattore 30.000 per quelli maggiori di tale fattore.
32	LAGO	Identificatore di area lacustre
33	VER_LAGO	Bacino elementare interessato da un'area lacustre

Da ultimo, va ricordato che, in corrispondenza delle aree lacustri, l'informazione altimetrica è ovviamente nulla. Ne consegue che i sottobacini elementari e i versanti principali generati dal programma per tali aree hanno necessariamente una valenza fisica parziale o nulla, con geometria interamente guidata dalla rete delle "blue-lines" della CTR, fornite come input al codice di calcolo.

Al fine di garantire la continuità spaziale dei dati sia poligonali (bacini/versanti principali) che lineari (linee di impluvio/displuvio), si convenuto di non escludere dal database tale informazione ricadente all'interno delle aree lacustri.

Si è quindi proceduto a creare i campi LAGO e BAC_LAGO/VER_LAGO (vedi Tab. 3 e 4) per permettere all'utente, se necessario, di selezionare agevolmente solo i poligoni parzialmente o totalmente esterni alle aree lacustri (Fig. 9).

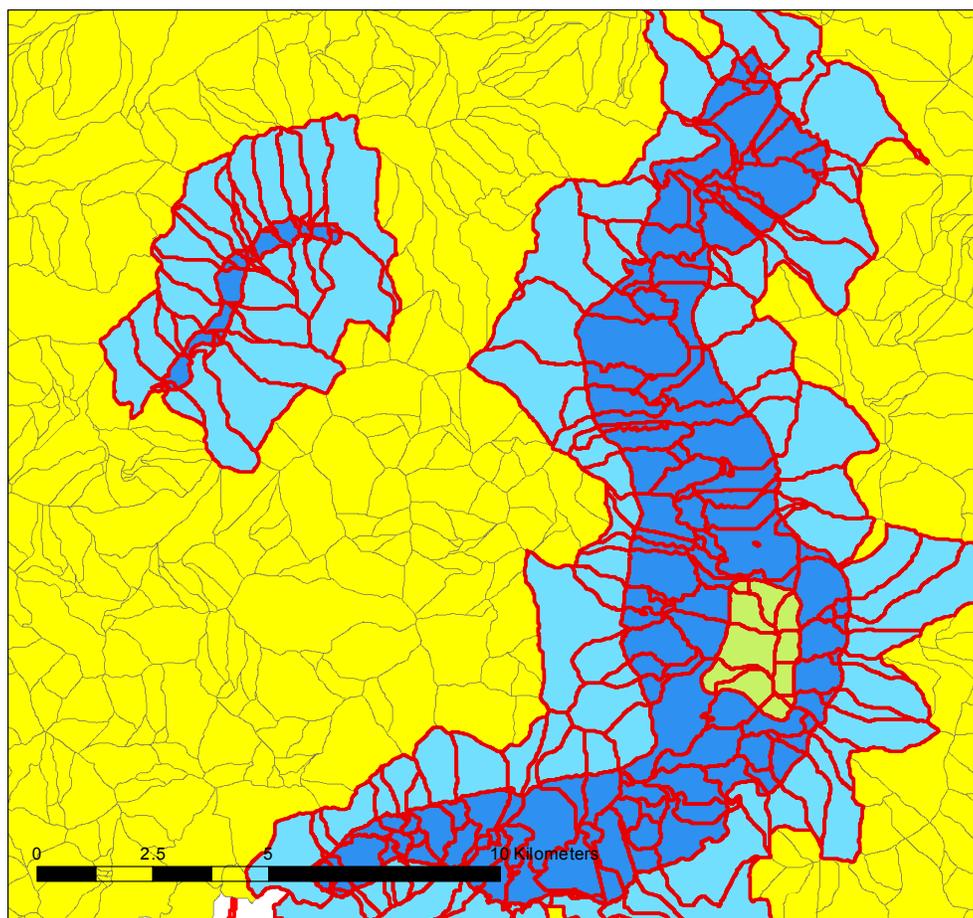


Fig. 9. Ripartizione del territorio in sottobacini elementari. I bacini che ricadono parzialmente o totalmente nelle aree lacustri (in blu scuro) sono evidenziati dal loro perimetro in rosso (porzione della cover *bac30_s*).

APPENDICE

1. PROCEDURA PER L'INDIVIDUAZIONE DEL RETICOLO IDROGRAFICO E DEGLI SPARTIACQUE DA UN MODELLO DIGITALE DEL TERRENO E DA UN RETICOLO IDROGRAFICO DIGITALE

Come già menzionato in precedenza, il metodo sviluppato si basa su un modello di simulazione della concentrazione dei deflussi superficiali prodotti da un ipotetico evento meteorico, di intensità spazialmente uniforme, verificatosi su un bacino idrografico inciso in terreni completamente impermeabili e privi di copertura vegetale. In tali circostanze, i deflussi - che in natura dipendono dall'interazione di molteplici e complessi fattori, d'ordine idraulico-pedologico, climatico, meteorologico e geomorfologico - vengono semplicemente controllati dalla morfologia del terreno.

Allo scopo di analizzare tali relazioni, l'area in esame viene suddivisa in elementi quadrati (celle) di dimensione prefissata e al centro di ogni cella determinata la quota; la matrice di quote così ottenuta costituisce quindi la sorgente di informazioni per l'intera procedura BACINI.

La procedura in oggetto consiste di tre insiemi distinti di programmi; al primo (fase di "pre-processing") appartengono i moduli preposti alla lettura e preparazione dei dati di input i quali effettuano conversioni di codice e di formato e quindi garantiscono l'interfacciamento con i sistemi su cui vengono prodotte le informazioni elaborate; nel secondo (fase di "processing") ricadono i moduli per l'individuazione delle linee di impluvio e di displuvio, e per la generazione di un reticolo pienamente connesso ed ordinato; del terzo (fase di "post-processing") fanno parte i sottoprogrammi per il calcolo dei parametri morfologici del reticolo e dei bacini-sottobacini e per la preparazione dell'output dei dati vuoi in forma tabellare vuoi in forma grafica (Fig. 1).

1.1. - *Pre-elaborazione dei dati*

Come sopra accennato, è stata curata la stesura di un insieme di programmi volti ad organizzare i dati nella forma richiesta dai moduli di elaborazione vera e propria. Fra questi, quello più importante (modulo STEP-0) svolge la funzione di "correzione" delle quote del DTM da impiegare. Vale ricordare come i diversi autori concordino sul fatto che la presenza di depressioni chiuse ("pits" o "buche") nel DTM porti inevitabilmente al cattivo funzionamento od al fallimento di qualsiasi algoritmo volto all'individuazione del reticolo idrografico.

È stato quindi messo a punto un filtro locale basato sull'impiego di due distinti algoritmi descritti altrove (Carrara, 1988, Carrara et al., 1988). Utilizzando una "kernel" (finestra) mobile di 3x3 punti, la matrice delle quote viene sequenzialmente scandita, verificando per ogni quota l'eventuale condizione di depressione (se la quota, cioè, del punto centrale della kernel sia inferiore a quelle degli otto punti contigui). Se questo è il caso, detta quota viene "aggiustata" incrementandola fino ad un valore di poco inferiore (0.1 m) a quello del punto, tra gli otto contigui, a quota minima; viene quindi esplorato l'intorno del punto in depressione (P_d) aumentando progressivamente il raggio di ricerca fino a trovare un punto (P.) a quota inferiore a quella "aggiustata" di P. Segue l'operazione per trovare il percorso

"ottimale", che non necessariamente coincide con quello più breve, tra i punti P_d e $P..$ A tal fine la finestra viene centrata sul punto a quota inferiore della terna di punti, fra gli otto contigui, più prossimi alla direzione di minima distanza tra P e $P..$ Dopo aver ripetuto l'operazione fino a raggiungere $P..$, le quote di tutti i punti così visitati vengono sostituite coi valori ottenuti interpolando linearmente le quote di P_d e $P..$.

Una serie di parametri (massimo raggio di ricerca, massima differenza di quota tra P_d e ciascun punto visitato lungo il percorso, ecc.), controllati dall'utente, permette di armonizzare il funzionamento dell'algoritmo con l'assetto morfologico dell'area e alla qualità dei dati del DTM impiegato.

Poiché in prossimità del bordo della matrice di quote si può verificare il caso in cui non esista un punto ($P..$) a quota inferiore di quella del punto in depressione (P_d), al termine della procedura sopra descritta alcune "pits" potranno ancora essere presenti; in tal caso la matrice del DTM viene scandita una seconda volta utilizzando un'altro algoritmo, analogo al precedente, che partendo da P_d individua il percorso "ottimale" per raggiungere il punto avente quota minore fra quelli posti sul bordo della matrice e situati a minor distanza da $P..$.

Quando si opera in bacini sufficientemente grandi, l'asta principale del corso d'acqua facilmente attraversa zone pianeggianti o comunque con rilievo tale da non poter essere adeguatamente espresso da un DTM anche a densità di campionamento elevata. In tali circostanze, è consigliabile integrare l'informazione altimetrica del DTM con quella ricavabile dalla rete drenante ("blue-lines") riportata su una cartografia topografica a scala idonea. A tal fine è stato sviluppato il modulo RAST-1 che crea una rete connessa e gerarchizzata delle aste fluviali derivate dalla cartografia topografica dell'area di studio; converte quindi tale rete vettoriale in una equivalente a struttura "raster", preservandone le caratteristiche topologiche e, per quanto possibile, geometriche.

Si precisa che l'operazione di conversione da vector a *raster* di un reticolo idrografico, o più in generale di un qualsiasi grafo, è quantomai agevole qualora la dimensione della cella del *raster* scelta sia di diversi ordini inferiore all'interspazio medio tra rami adiacenti del reticolo. In situazioni diverse (raster a maglia ampia rispetto alla densità del reticolo), emergono inevitabilmente situazioni di non facile soluzione concettuale ed algoritmica.

Il modulo RAST-1 una volta definito dall'utente il passo della cella e il punto di origine della griglia, effettua la "rasterizzazione" delle aste del reticolo partendo da quella di ordine massimo e via via fino a quelle di ordine I. In tal modo, quando si verifica la situazione in cui i punti appartenenti a due aste diverse ricadono nella stessa cella, il punto relativo all'asta di ordine inferiore viene spostato, con tecnica iterativa e di back-tracking, su quella fra le celle adiacenti che comporta sia un minimo di modificazione della geometria del reticolo, che la conservazione integrale della topologia dello stesso. La posizione dei punti terminali di ogni asta, e quindi dei nodi (confluenze), viene infatti sempre conservata, salvo il caso di punti quadrupli. Anche questi ultimi sono presi in considerazione dalla procedura, che li risolve usando una tecnica analoga a quella impiegata nella generazione del reticolo digitale successivamente descritta.

Al termine dell'elaborazione, viene quindi prodotto un reticolo discretizzato pienamente connesso, ordinato, codificato e spazialmente congruente con il DTM del territorio preso in esame. Tale reticolo viene quindi memorizzato in forma matriciale ove per ogni cella costituente un'asta sono registrati sia il puntatore, esprime la direzione e il verso della medesima in quel punto, che l'ordine.

Avendo a disposizione tale tipo di dati, è possibile procedere alla correzione delle quote del DTM utilizzando l'informazione idrografica. In presenza di una matrice delle "blue-lines"

discretizzate, il modulo STEP-0 (Fig. 1), infatti, opera nel seguente modo.

A mezzo di una finestra mobile di 3x3 elementi, centrata sul punto del DTM corrispondente alla cella terminale dell'asta di ordine massimo, vengono esaminate le pendenze delle due celle in destra e sinistra idrografica poste subito a monte del punto in esame. Se una o ambedue le celle non "versano" sul punto in questione, né sulla cella adiacente del reticolo, la quota di quest'ultimo viene decrementata del minimo necessario affinché sia soddisfatta tale condizione; altrimenti la "kernel" viene spostata a monte di una cella e il test ripetuto. In tal modo viene risalita tutta l'asta terminale del reticolo e, ove necessario, decrementata la quota dei punti dello stesso. La procedura viene ripetuta sequenzialmente per tutte le quote appartenenti a tutte le aste dello stesso ordine e quindi per quelle relative alle aste via via di ordine inferiore.

Successivamente, al fine di individuare ed eliminare eventuali punti in depressione posti lungo le aste del reticolo, le quote dei punti corrispondenti ad ogni asta di I ordine vengono scandite partendo dal nodo esterno (sorgente) di ciascuna di esse. Se un punto in depressione viene incontrato, questo viene corretto tramite un filtro locale, del tipo "media mobile", volto a garantire, minimizzando la modifica del profilo longitudinale, la continuità di pendenza verso valle di tutti i punti dell'asta elaborata. La stessa operazione viene quindi sequenzialmente ripetuta per tutte le aste di ordine progressivamente superiore fino a giungere alla (o alle foci) del reticolo idrografico.

Al termine di questa fase si ottiene, pertanto, un DTM il cui andamento altimetrico è congruente con quello del reticolo idrografico discretizzato. È forse superfluo sottolineare che il numero di quote corrette e l'entità della correzione sarà funzione della "qualità" del DTM e del reticolo idrografico "rasterizzato". In tutti i casi, l'effetto complessivo della tecnica adottata consiste in un generale decremento altimetrico del profilo longitudinale del reticolo.

L'ultima elaborazione da effettuarsi sul DTM riguarda l'individuazione e correzione dei punti in depressione non coincidenti, né adiacenti il reticolo idrografico. Tali "pits" vengono agevolmente risolte utilizzando i due algoritmi sopradescritti del modulo STEP-0.

1.2. - *Elaborazione dei dati*

La fase successiva della metodologia si articola in due sottofasi funzionalmente distinte. La prima (modulo STEP-1) è preposta alla generazione del modello "morfologico" di distribuzione dei deflussi superficiali; la seconda (modulo STEP-2) produce il reticolo idrografico e definisce per ogni asta ("link") il corrispondente sottobacino elementare.

Utilizzando una finestra mobile di 3x3 punti, al primo elemento (cella) della matrice delle quote "corrette" vengono associate le coordinate della cella, fra le otto contigue, posta lungo la direzione di massima pendenza, nonché assegnato un codice pari ad uno. Spostando ogni volta la finestra lungo la direzione di massima pendenza, l'operazione viene sequenzialmente ripetuta e la matrice delle quote percorsa fino a raggiungere una cella di bordo; quest'ultima è quindi classificata come foce "locale".

Centrando la finestra mobile sul secondo elemento della matrice delle quote, il processo viene avviato una seconda volta e ripetuto fino al momento in cui si incontra o una cella di bordo (foce) o una cella precedentemente visitata e quindi contrassegnata da un valore maggiore di 0 del contatore (in questo "step" pari ad uno). In quest'ultimo caso, la finestra mobile seguirà il percorso definito dalle celle già marcate, semplicemente incrementando di una unità il codice di ogni cella.

Ripetendo l'operazione per tutte le celle della matrice di quote, si ottengono due insiemi di dati, denominati rispettivamente matrice dei "puntatori" e matrice dei "contatori": la prima indica il percorso teorico dei deflussi di ogni cella rispetto alle otto celle adiacenti; la seconda, fornendo per ogni cella la rispettiva area (in numero di celle) contribuente, rappresenta la distribuzione dei deflussi sotto le ipotetiche condizioni enunciate in precedenza. Tali dati, la cui acquisizione è assai semplice ma molto onerosa sotto l'aspetto computazionale (i tempi di CPU aumentano approssimativamente col quadrato delle dimensioni della matrice di quote), forniscono l'informazione necessaria e sufficiente per l'identificazione della rete di impluvi e displuvi.

Prima di iniziare la fase successiva, è necessario predefinire ed assegnare i seguenti parametri di soglia: superficie minima dei sottobacini di I ordine (AREA), lunghezza minima dei rami/aste di I ordine (LUN) e rapporto minimo tra area del bacino e lunghezza dell'asta (RSL). A seconda dei valori assegnati a detti parametri, il reticolo idrografico generato dalla procedura presenterà un grado di generalizzazione diverso, in modo del tutto analogo a quanto si verifica riportando lo stesso reticolo idrografico su documenti cartografici a scala diversa.

L'algoritmo sviluppato mira, partendo da ciascuna delle foci locali poste sul bordo della matrice di quote, a "risalire", con tecnica ricorsiva, tutte le aste che drenano verso la foce esaminata.

A tal fine una finestra mobile, sempre di 3x3 punti, viene centrata sulla cella corrispondente ad una foce e, delle otto celle contigue, viene scelta e marcata quella con puntatore diretto verso il centro della finestra e con valore di contatore maggiore della soglia predefinita. Tale cella è quindi classificata come parte dell'asta fluviale in corso di definizione. La finestra viene quindi centrata su detta cella e l'analisi del suo intorno ripetuta. L'operazione è sequenzialmente ripetuta, muovendo ogni volta la kernel verso "monte".

Quando due celle dell'intorno della cella esaminata presentano valori di contatore (area contribuente) maggiori della soglia, questa è classificata come nodo interno (confluenza); viene quindi risalita l'asta con valore di contatore minore e, con lo stesso criterio tutti i suoi tributari fino a raggiungere, per ciascuno di essi, una cella le cui vicine presentino tutte un area contribuente inferiore alla soglia; questa è classificata come nodo esterno (sorgente). La finestra è quindi spostata sul primo nodo interno trovato e l'altra asta è trattata allo stesso modo fino a raggiungere tutti i suoi nodi esterni.

Può verificarsi il caso di una confluenza quadrupla, cioè di una cella con 3 celle contigue con area contribuente maggiore del valore di soglia. Tale situazione, che non trova riscontro in natura, è semplicemente imputabile alla stessa discretizzazione delle quote: tanto minore è la densità di campionamento o la qualità del DTM, tanto maggiore sarà la frequenza di confluenze quadruple od anche quintuple (cfr. Jenson, 1985; Band, 1986). Poiché confluenze di tale tipo costituiscono un ostacolo non facilmente superabile per ogni algoritmo di gerarchizzazione, si è proceduto alla loro modificazione nel seguente modo. Quando un nodo quadruplo è incontrato, viene analizzata la morfologia del suo intorno e spostato di una cella a monte o a valle il punto terminale dell'asta ad area contribuente minore. Qualora tale spostamento non sia possibile senza alterare la geometria/topologia del reticolo, l'asta con valore di contatore più basso viene semplicemente eliminata.

Al termine della procedura per ogni foce si ottiene un reticolo idrografico pienamente connesso e ordinato con numerazione progressiva dal nodo di foce a quelli di sorgente. Durante tale fase viene anche costruito il vettore topologico del reticolo (Jarvis, 1984) da cui ricavare agevolmente la gerarchizzazione dello stesso secondo il criterio scelto dall'utilizzatore.

Il passo immediatamente successivo comporta la identificazione dei sottobacini elementari corrispondenti ad ogni asta.

A mezzo di una finestra mobile di 3x3 punti, iniziando dal primo elemento della matrice dei puntatori viene sequenzialmente seguito e marcato il percorso definito dai puntatori di ogni cella fino al momento in cui una cella appartenente ad un'asta viene incontrata; a tutte le celle visitate durante tale percorso è quindi assegnato il numero di codice dell'asta incontrata. L'operazione viene avviata una seconda volta partendo dal secondo elemento della matrice; in tal caso e in tutti quelli successivi, il percorso effettuato dalla kernel può terminare o incontrando una cella costituente un'asta, o una cella visitata durante un percorso effettuato in precedenza; in ambedue i casi, le celle del nuovo percorso vengono attribuite all'asta fluviale di loro pertinenza. Ripetendo l'operazione per tutti gli elementi della matrice, risulta la completa ripartizione della stessa in sottobacini elementari; pertanto al termine della procedura illustrata si avrà: un reticolo idrografico pienamente connesso e ordinato, e un reticolo complementare di spartiacque parimenti connesso e codificato.

Vale sottolineare che la metodologia prescelta comporta una asimmetria nella codifica delle linee di impluvio e di displuvio: ciascuna delle prime corrisponde ad un insieme di celle opportunamente marcate, mentre le seconde sono definite dai *confini* di celle codificate diversamente in quanto appartenenti a sottobacini differenti. Tale organizzazione dei dati trova ragione tanto nella maggior facilità di archiviazione ed elaborazione durante la fase di calcolo dei parametri morfologici, quanto nel miglior sfruttamento dell'interspazio (imposto dalla risoluzione del DTM) fra aste adiacenti.

Tutti questi dati vengono quindi memorizzati in forma sia matriciale che tabellare: la prima permette agevolmente la loro rappresentazione grafica ed analisi spaziale; la seconda semplifica le elaborazioni statistiche e il trasferimento ad altri sistemi di calcolo.

1.3. - Elaborazione per il calcolo dei parametri di bacino e per la conversione raster-vettoriale dei dati

Il terzo insieme di programmi sviluppati è preposto alla determinazione dei parametri morfologici fondamentali di bacino. Alcuni di questi (lunghezza d'asta, gerarchizzazione, ecc.) corrispondono a quelli tradizionalmente determinati per i reticoli idrografici; altri (area di ogni sottobacino elementare, esposizione e pendenza di ogni emi-bacino, ecc.) possono essere considerati unici nella misura in cui il loro calcolo manuale richiederebbe tempi estremamente lunghi. In particolare, per ogni asta, appartenente ad ogni bacino individuato all'interno della matrice di quote esaminata ed avente foce "relativa" in corrispondenza di uno dei bordi della medesima, vengono definiti i seguenti codici di riconoscimento e calcolati i parametri morfologici elencati in Tav. 2 e 3.

Da ultimo, si è proceduto all'implementazione di una serie di moduli per la conversione dei dati da *raster* a vettoriale.

REFERENZE CITATE

- Band L.E., 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resour. Res.*, v. 22, p.15-24.
- Beven K.J. & Kirkby M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol.Sci. Bull.*, v. 24, p. 43-69.
- Carrara A., 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematica! Geol.*, v. 15, No 3, p. 403-426.
- Carrara A., 1988. Drainage and divide networks derived from high- fidelity digital terrain models. In: Chung C.F. et al. (eds.), *Quantitative analysis of mineral and energy resources*, NATO-ASI, June22-July4,1986, p. 581-597, D. Reidei Pub. Co., Dordrecht.
- Carrara A., Detti R., Federici G. & Pasqui V., 1988. Reticoli idrografici e parametri morfologici di bacino da modelli digitali del terreno. *CNR-Linea 3, Gruppo Naz. Difesa Catastrofi Idrogeol.*, 60 p., Genova.
- Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F. & Reichenback P., 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. In Carrara A & Guzzetti F. (eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, p. 135-176, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht.
- Dietrich, W. E., C. J. Wilson, D. R. Montgomery and J. McKean, 1993. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model. *The Journal of Geology*. v. 101, p. 259-278.
- Jarvis R.S., 1984. Topology of tree-like networks. In: Gaile G.L. & Willmott C.J. (eds.), *Spatial statistics and models*, p. 271-292, Reidei Pubbl. Co., Boston.
- Jenson, S. K., 1991. Applications of Hydrologic Information Automatically Extracted From Digital Elevation Models. *Hvdrological Processes*. v. 5(1), p. 31-44.
- Jenson, S. K. and J. O. Domingue, 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54(11), p. 1593-1600.
- Marks D., Dozier J., Frew J., 1984. Automated basin delineation from digital elevation data. *Geo-Processing*, v. 2, p. 299- 311.
- Montgomery, D. R. and E. Foufoula-Georgiou, 1993. Channel network source representation using digital elevation models. *Water Resources Research*. v. 29(12), p. 3925-3934.
- Palacios-Velez O.L. & Cuevas-Renaud B., 1986. Automated river- course, ridge and basin delineation from digital elevation data. *Jour. Hydrol.*, v. 86, p. 299-314.
- Puecher T.K. & Douglas D.H., 1975. Detection of surface specific points by local parallel processing of discrete terrain elevations data. *Comput. Graph. Image Proc.*, v. 4., p.375-387.
- Shreve R.L., 1966. Statistical law of stream numbers. *Jour. Geol.*, v. 74, p. 17-37.

Shreve R.L., 1967. Infinite topologically random channel networks. *Jour. Geol.*, v. 75, p.178-186.

Strahler A.N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bull. Geol. Soc. America*, v. 63, p. 1117-1142.

Strahler A.N., 1958. Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. In: V.T. Chow (ed.) *Handbook of applied hydrology*, Sec. 4-II. McGraw-Hill, New York.

Tarboton, D. G., R. L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe, 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data, *Hydrologic Processes*. V. 5(1): p. 81-100.

Tarboton, D. G., R. L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe, 1992. A Physical Basis for Drainage Density. *Geomorphology*. V. 5(1/2): p. 59-76.

Zavoianu I., 1985. Morphometry of drainage basins. *Developments in Water Science*, 20. Elsevier, Amsterdam.