

Confronto tra alcuni metodi per l'estrazione del reticolo idrografico da DEM in presenza di aree piane

Comparison among automatic drainage network extraction methods for DEMs with flat areas

Andrea Petroselli¹, Fernando Nardi¹, Monia Santini², Salvatore Grimaldi^{1,3}, Lucio Ubertini^{3,4}

¹Dipartimento GEMINI, Università degli Studi della Tuscia, via Camillo de Lellis snc, 01100 Viterbo, petro@unitus.it, fernando.nardi@unitus.it, salvatore.grimaldi@unitus.it

²Dipartimento DISAFRI, Università degli Studi della Tuscia, via Camillo de Lellis snc, 01100 Viterbo, monia.santini@unitus.it

³Centro Interuniversitario di Formazione Internazionale – H2CU, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, 00184 Roma

⁴Dipartimento DITS, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, 00184 Roma, lucio.ubertini@uniroma1.it

Contact Author: Salvatore Grimaldi, salvatore.grimaldi@unitus.it, 0761 357326, 320 4271486

Sommario

In questo lavoro si analizzano alcuni metodi per la definizione delle direzioni di deflusso e per il trattamento delle aree piane dei Digital Elevation Model (DEM). La procedura presente nei più utilizzati pacchetti software (ESRI ArcInfo e GRASS) viene confrontata con alcune tecniche recentemente proposte in letteratura, analizzando i risultati ottenuti su un sottobacino del Fiume Tevere. Il confronto viene svolto sia stimando alcuni parametri idro-geomorfologici, ma soprattutto valutando diverse grandezze di progetto delle analisi idrologiche più comuni.

Parole chiave: DEM, Aree piane, GIS

In this manuscript some DEM-based flow-direction methods and flat area treatment approaches are investigated. The standard procedure of widely used GIS software packages (ESRI ArcInfo and GRASS) is compared to some new recently proposed techniques analysing results obtained on a small sub-basin of the Tiber river. Differences of the new experimental procedures as respect to the standard approach are evaluated in term of some hydrogeomorphic variables and other hydrological design parameters.

Keywords: DEM, Flat Areas, GIS

1) Introduzione

Lo sviluppo ed applicazione dei Digital Elevation Model (*DEM*) per l'estrazione automatica dei parametri morfometrici ed idrogeomorfologici necessari all'implementazione di modelli idraulici, idrologici e geomorfologici è divenuta in tempi recenti pratica comune sia in ambito di ricerca che per fini applicativo-professionali, sostituendo le vecchie procedure manuali basate sulla digitalizzazione ed interpretazione delle carte tecniche topografiche; a titolo di esempio si citano i software TOPAZ (Garbrecht e Martz, 1997b), TAUDEM (Tarboton and Ames, 2001), TOPMODEL (Beven e Kirkby, 1979) e TAS GIS (Lindsay, 2005). I più diffusi software *GIS* (Geographic Information System), come la suite commerciale della ESRI, ArcInfo (*ESRI*, 1990), e l'open source *GRASS* (Neteler e Mitasova, 2002), includono dei moduli specifici per la caratterizzazione idrogeomorfologica dei bacini idrografici in automatico utilizzando i *DEM*.

La tipologia più diffusa di *DEM* è costituita da una matrice (grid) equispaziata di punti quotati che permette di ottenere una rappresentazione digitale della topografia a celle quadrate al cui baricentro viene associata l'elevazione assoluta media del terreno e la cui dimensione è detta risoluzione. La caratterizzazione idrogeomorfologica consiste nella valutazione diretta delle principali informazioni morfometriche quali le pendenze, le curvature, il massimo, il minimo e la distribuzione delle elevazioni nel bacino, la forma della curva ipsografica e consiste inoltre nelle analisi indirette più complesse del *DEM*, tramite le quali è possibile identificare le direzioni locali di deflusso, il reticolo fluviale e le aree di drenaggio, i limiti e l'area del bacino idrografico, l'ordinamento delle rete secondo il metodo di Horton-Strahler (*Horton*, 1945; *Strahler*, 1957), le isocorive da cui si possono desumere, per citare alcune grandezze, il tempo di corrivazione e la funzione di ampiezza.

Tuttavia tali procedure automatiche *GIS* sono spesso affette da significativi margini d'errore, soprattutto se utilizzate da operatori non particolarmente esperti, dovuti in parte alla struttura ed all'imprecisione insita nel *DEM* stesso, ma anche e soprattutto per le approssimazioni teorico-metodologiche alla base degli algoritmi che ne restringono la validità d'utilizzo solo a determinati casi. Sono numerosi gli studi in letteratura che illustrano, infatti, come esistano degli elementi spuri nei *DEM*, dal punto di vista idrologico, quali le depressioni artificiali, i versanti planari e le zone a pendenza nulla (e.g. *Mark*, 1988; *Martz e Garbrecht*, 1999; *Wilson e Gallant*, 2000;

Olivera et al., 2000), che impediscono la corretta stima di tali parametri e, inoltre, come gli algoritmi di calcolo delle variabili morfometriche, idrologiche e geomorfologiche soffrono della scarsa flessibilità della struttura matriciale che non è facilmente adattabile alle eterogeneità delle diverse macrostrutture topografiche e dei diversi processi fisici che distinguono le zone vallive dai versanti (e.g. *Martz e De Jong*, 1988; *Mackay and Band*, 1998; *Nardi et al.*, 2006).

La caratterizzazione idrogeomorfologica è basata principalmente sulla stima dei percorsi di scorrimento delle acque superficiali ottenuti mediante l'assegnazione per ogni cella del bacino della locale direzione di drenaggio. A tale concetto ci riferiremo per semplicità con l'acronimo *FD* (ossia Flow Direction, utilizzando la dizione anglosassone). La determinazione della *FD* si basa sul principio fisico che una massa che procede a gravità, quale una particella liquida che scorre sul terreno, segue la direzione di massima pendenza. Tale concetto, tradotto nello schema del dato raster o grid della rappresentazione matriciale del *DEM*, consiste nella stima della direzione della tangente alla superficie topografica lungo la linea di massima pendenza alla quale ci si riferisce solitamente con il termine di direzione di deflusso teorica o *TFD* (Theoretical Flow Direction). Per semplicità di calcolo solitamente si approssima la *TFD* con una delle otto direzioni cardinali (Est, Nord, Ovest, Sud) o diagonali (Nord-Est, Nord-Ovest, Sud-Ovest, Sud-Est) (e.g. *Jenson e Domingue*, 1988; *Tarboton*, 1997; *Orlandini et al.*, 2003). Una ulteriore condizione semplificativa è costituita dall'ipotesi che la massa liquida si propaghi dalla cella di monte alla cella di valle interamente senza dispersione in due o più celle riceventi. Tale condizione, se pure accettabile in via approssimata per i deflussi di tipo canalizzato nelle zone vallive a curvatura positiva (concave), non può essere valida per quegli elementi del territorio dominati dai fenomeni a carattere puramente diffusivo quali i versanti, per i quali la mancata canalizzazione comporta la dispersione della massa drenante lungo più fronti di scorrimento.

Il criterio di differenziazione dei metodi di *FD* consiste proprio nel distinguere:

a) metodi che ipotizzano un flusso canalizzato (o concentrato) ed il trasferimento completo della massa da cella a cella secondo la direzione di massima pendenza approssimata in una delle otto direzioni possibili (D8) anche detti Single Flow Direction o *SFD* (*O'Callaghan e Mark*, 1984; *Jenson e Domingue*, 1988; *Fairfield e*

Leymarie, 1991; Costa-Cabral e Burges, 1994; Garbrecht e Martz, 1997a; Orlandini et al., 2003);

b) metodi dispersivi che consentono il frazionamento della massa liquida da una cella a più celle, selezionate opportunamente tra le celle adiacenti a quota uguale od inferiore identificate utilizzando il concetto *TFD* puro o approssimato (D8) anche detti Multi Flow Direction methods o *MFD* (Freeman, 1991; Quinn et al., 1991; Lea, 1992; Costa-Cabral e Burges, 1994; Holmgren, 1994; Quinn et al., 1995; Tarboton, 1997; Pilesjo et al., 1998; Lindsay, 2003).

In letteratura sono presenti numerosi lavori che introducono nuovi metodi di tipo *SFD* e *MFD* ed, inoltre, anche vari studi di comparazione delle varie metodologie esistenti. Tuttavia, tali analisi sono spesso costituite da valutazioni di tipo qualitativo, basate sul confronto visivo dei risultanti reticoli di drenaggio (e.g. Erskine et al., 2006), e talvolta mediante stime di tipo quantitativo, ma utilizzando nella maggior parte dei casi superfici sintetiche (e.g. Zhou and Liu, 2002; Quinn et al., 1995) o valutando indici indiretti quale l'indice topografico (Topographic Index o TI) (e.g. Wolock and McCabe, 1995; Desmet and Govers, 1996) utilizzato nel modello idrologico *TOPMODEL* (Beven and Kirkby, 1979; Pan et al., 2004). In sintesi le considerazioni principali risultanti dalle attività di ricerca sviluppate in tali lavori possono essere schematicamente riassunte nei seguenti tre punti: a) la difficoltà per i metodi *SFD* di ricostruire correttamente i processi di deflusso nelle parti del bacino non canalizzate, ossia sui versanti, dove sono più adatti i metodi *MFD*, che per contro creano problemi nell'estrazione del reticolo idrografico ossia nel rappresentare accuratamente il deflusso canalizzato; b) la mancanza di analisi di tipo quantitativo sui metodi *SFD* e *MFD* soprattutto in merito alla ricostruzione del reticolo idrografico; c) la mancanza di studi approfonditi sulla problematica dell'impossibilità di definire con accuratezza le *FD* sulle zone a scarsa pendenza o a pendenza nulla dove la *TFD* non è stimabile per definizione, come nel caso delle aree pianeggianti o in presenza di depressioni artificiali, nonostante sia sottolineato in numerosi studi quanto questo fenomeno sia spesso presente nei *DEM*.

In una recente memoria (Nardi et al., in revisione) si è cercato di ovviare a tali mancanze proponendo una serie di analisi di tipo qualitativo e quantitativo per confrontare i principali metodi *SFD* e *MFD* in relazione all'estrazione del reticolo di drenaggio ed alla stima dei più utilizzati parametri idrologici e geomorfologici sia a

scala di bacino quali il tempo di corrivazione T_c (Chow and Maidment, 1988) e la funzione di ampiezza o Width Function (WF) (Rodríguez-Iturbe, Rinaldo, 1997), che a scala del reticolo fluviale come la densità di drenaggio e i rapporti Hortoniani HP (Horton, 1945). Sulla base di tale lavoro si è potuto constatare come il metodo *SFD* proposto da Orlandini et al. (2003) sembri il più adatto nella rappresentazione del reticolo di drenaggio. Inoltre è stato approfonditamente affrontato il problema del trattamento delle aree a pendenza nulla confrontando diversi metodi *SFD* e *MFD* su superfici modificate con specifiche routines di correzione idrologica dei *DEM* per la rimozione delle aree piane, introducendo anche un nuovo metodo fisicamente basato di correzione dei *DEM* (Grimaldi et al., 2007).

In questo lavoro vengono ulteriormente approfonditi alcuni aspetti applicativi, ed, in particolare, dopo una breve descrizione dei metodi *SFD* e di correzione dalle aree pianeggianti presentata nella seguente sezione 2, viene quantitativamente descritto l'impatto della problematica delle aree piane nei *DEM* nella sezione 3. Vengono dunque presentati, nella sezione 4, il bacino ed il *DEM* del torrente Rigo, affluente di destra del fiume Tevere al confine tra Umbria e Lazio e, nella sezione 5, la metodologia alla base delle applicazioni di caratterizzazione idrogeomorfologica sviluppate. Vengono infine riportati, nella sezione 6, i risultati delle applicazioni basate sulla stima delle portate, degli idrogrammi e degli ietogrammi di progetto utilizzando diverse combinazioni di metodi di trattamento delle aree piane e di definizione delle *FD*, e vengono tratte le opportune conclusioni nella sezione 7.

2) Metodi di definizione delle direzioni di drenaggio e di trattamento delle aree piane

Nel presente lavoro vengono presi in considerazione due metodi *FD*: 1) il *D8*, metodo *SFD* basato sull'approssimazione della *TFD* secondo lo schema ad otto direzioni possibili e la concentrazione dei deflussi senza dispersione. E' il metodo più ampiamente utilizzato essendo disponibile nella suite GIS della ESRI, ArcInfo (O'Callaghan and Mark, 1984; Jenson and Domingue, 1988, ESRI, 1990); ad esso per semplicità ci si riferirà con il termine *ArcInfo-D8*; 2) il metodo proposto da Orlandini et al. (2003), basato sull'approssimazione della *TFD* secondo la più pendente delle 8 faccette triangolari proposte originariamente da Tarboton (1997); tale metodo è privo di dispersione laterale e minimizza la 'deviazione trasversale laterale cumulata' (*LTD*)

lungo il percorso. In pratica, il metodo conserva in memoria la misura lineare dello scarto laterale tra la direzione approssimata e la *TFD* dei passi precedenti ed approssima il percorso di drenaggio di conseguenza.

Per quanto riguarda i metodi di caratterizzazione delle FD su aree a pendenza nulla sono disponibili due tipologie di approccio: 1) metodi che non modificano l'elevazione delle celle proponendo una stima delle *FD* basata sull'elaborazione dell'informazione altimetrica originale e 2) metodi che modificano l'elevazione delle celle per imporre sulla topografia pendenze non nulle.

Nella prima categoria ricade il metodo implementato in ArcInfo (*Jenson and Domingue, 1988; ESRI, 1990*), che parte dall'identificazione della più probabile cella di sbocco (outflow) della zona pianeggiante, di definita *FD*, e assegna alle celle adiacenti subito a monte la *FD* corrispondente alla direzione che punta la cella di outflow e poi iterativamente assegna la *FD* ad ogni cella subito a monte crescendo fino a coprire l'intera area pianeggiante, la quale alla fine della procedura sarà caratterizzata interamente da celle idrologicamente connesse alla cella di outflow della zona pianeggiante. Tale metodo, tuttavia, produce percorsi di drenaggio non realistici con i caratteristici tratti a pettine con direzioni di deflusso rettilinee e parallele. Nella seconda categoria è incluso il metodo di correzione del *DEM* di *Garbrecht and Martz (1997a)* (a cui di seguito ci si riferirà con l'acronimo *G&M*), disponibile nel software *TOPAZ (Garbrecht and Martz, 1997b)*, che modifica le elevazioni in corrispondenza della zona piana mediante lievi incrementi per le celle piane adiacenti alle celle di monte e lievi decrementi per le celle piane adiacenti le celle di valle, incrementando l'elevazione delle celle sui contorni laterali della zona piana. In tal modo, l'area piana viene sostituita da una zona canalizzata a gradiente positivo verso valle secondo il principio che la propagazione avviene da monte verso valle in zone a caratteristiche morfologiche di tipo concavo tendenti all'accumulo. Di questa categoria fa parte anche un nuovo metodo sperimentale, detto *PEMAPIT*, che sta per 'Physical Erosion Model for PIT Removal' (*Grimaldi et al., 2007*), basato sull'implementazione di una nota equazione di equilibrio dinamico dei bacini idrografici (*Willgoose et al., 1991a, 1991b*) secondo il quale il sollevamento tettonico è in equilibrio con la dinamica dei processi erosivi e diffusivi. Il *PEMAPIT* identifica le elevazioni dei punti del bacino per i quali la *TFD* non è stimabile come le depressioni artificiali e le zone a pendenza nulla e le modifica in modo che rispettino l'equazione di equilibrio dinamico.

3) L'impatto delle aree piane nei DEM

Dal punto di vista delle applicazioni idrologiche e geomorfologiche le aree piane non vengono mai considerate come elementi naturali del territorio, ma vengono trattate come zone spurie, non realmente rappresentative della superficie topografica reale, e come tali vanno analizzate e rimosse dal dato originale. In effetti, in molti casi le aree pianeggianti derivano da artifici numerici, come nel caso dei metodi di interpolazione utilizzati per produrre la matrice a passo regolare a partire da punti sparsi, o l'effetto del troncamento del dato nel passaggio da decimale ad intero, o per problematiche inerenti gli strumenti e le tecniche di acquisizione stesse quali l'analisi delle onde prodotte da sensori da remoto (aereo, satellitare) che non vengono correttamente riflesse da tutti i tipi di copertura del suolo o da zone in ombra generando vuoti nei dati. Un altro fattore che determina una significativa presenza di aree piane è costituito dalle procedure di rimozione delle depressioni artificiali (pit) (*Jenson and Domingue, 1988; Grimaldi et al., 2007; Nardi et al., in revisione*) che consistono solitamente nel riempimento di tali impurità formando laghetti interni (metodo *flooding*) e la conseguente sostituzione dei pit con aree a pendenza nulla. L'impatto delle aree a pendenza nulla nei *DEM* di più comune utilizzo è significativa. Dall'analisi del *DEM* della penisola italiana (isole escluse) prodotto dall'IGM ad una risoluzione di 75 m, su una superficie complessiva di circa 251.634 km² è stata stimata una superficie pianeggiante tramite la funzione *SLOPE* di ArcInfo (*Burrough, 1986; ESRI, 1990*) pari al 7% dell'estensione totale e pari al 20% dopo la rimozione dei pit con il metodo *flooding*, senza ovviamente considerare l'ulteriore 5000 km² di superficie costituito dai laghi effettivamente presenti sul territorio. In aggiunta, si consideri che la percentuale di aree pianeggianti aumenta in corrispondenza delle zone a carattere vallivo in adiacenza delle aste fluviali proprio dove è maggiore l'interesse dei modelli idrogeomorfologici (*Nardi et al., 2006*).

4) L'area di studio

Il bacino idrografico del torrente Rigo alla confluenza con il fiume Tevere, in provincia di Viterbo, è stato selezionato come area di studio. Il DEM del bacino, fonte IGM, è riportato in Figura 1 e le relative caratteristiche principali sono riportate in Tabella 1. Si noti come, nonostante una percentuale moderatamente bassa di pit, le zone

pianeggianti (mostrate in Figura 2), sia prima che dopo il pit filling (operazione effettuata con il comando *FILL* di ArcInfo) siano significative.

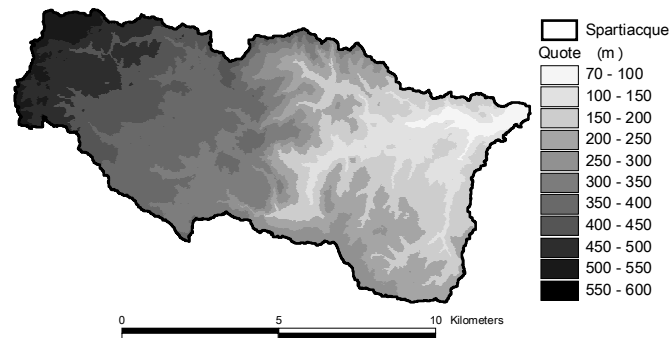
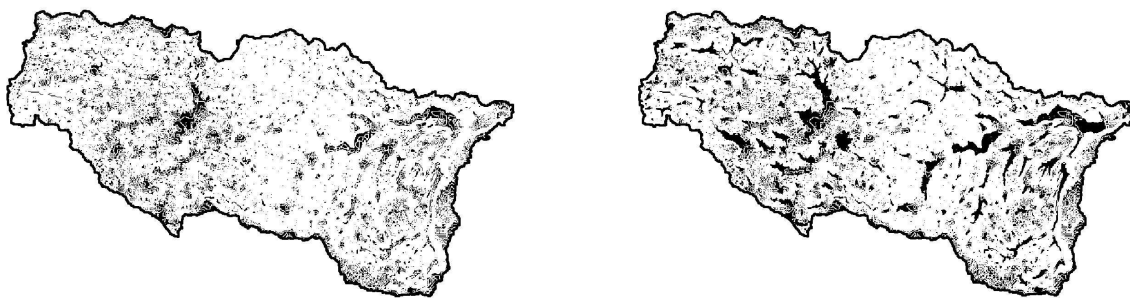


Figura 1: L'area di studio: bacino idrografico del torrente Rigo (VT).

DEM Rigo				
Fonte	Cellsize (m)	Precisione	Area (Kmq)	Pit (%)
IGM	20	INT	84.25	1.001
Zmin (m)	Zmax (m)	Zmed (m)	Area piana prima del filling	Area piana dopo il filling
70	551	298.27	13.56%	19.35%

Tabella 1: Caratteristiche morfometriche del DEM del bacino del torrente Rigo (VT).



Aree piane prima del pit filling (13.56%)

Aree piane dopo il pit filling (19.35%)

Figura 2: Distribuzione delle aree a pendenza nulla (in nero).

5) Metodologia

Nel presente studio vengono utilizzati due metodi di correzione delle aree piane e due metodi di definizione delle direzioni di drenaggio combinati in tre scenari possibili che corrispondono uno alla metodologia standard e gli altri due a modelli sperimentali. L'utilizzo combinato dei differenti schemi nella stima di alcuni parametri a scala di bacino e di reticolo fluviale consente di poter valutare quale sia l'impatto del metodo di preprocessamento del DEM rispetto al metodo di determinazione delle *FD* in relazione all'implementazione di modelli idrologici e geomorfologici. Le tre combinazioni utilizzate sono:

a) il metodo standard, detto *ArcInfo-D8* (essendo implementato nella suite commerciale ArcInfo), basato sulla correzione dei pit mediante la *flooding procedure* (comando *FILL* del modulo *GRID* di ArcInfo) e sulla definizione delle *FD* anche su aree piane senza ulteriore modifica del *DEM* tramite la metodologia sopra definita *ArcInfo-D8* (*Jenson and Domingue, 1988*);

b) il metodo di trattamento delle aree piane *G&M* combinato al metodo *Orlandini-LTD* per la determinazione della *FD*; nel seguito ci si riferirà a tale metodologia con l'acronimo *G&M-LTD*;

c) il *PEM4PIT* in unione al metodo *Orlandini LTD*, di seguito anche detto *PEM4PIT-LTD*.

Una volta ottenuta la *FD* per ogni cella del bacino si stima la distribuzione spaziale delle aree contribuenti (*CA*) essendo noto il numero di celle drenate da ogni cella ed anche la dimensione caratteristica delle celle. Dalla matrice delle aree contribuenti è possibile identificare le celle costituenti il reticolo idrografico come quelle celle che drenano un'area maggiore di un valore minimo predefinito (*Montgomery e Dietrich, 1989, 1992; Tarboton et al, 1991*). Tale soglia, per la cui identificazione sono numerosi gli studi proposti in letteratura (e.g. *Istanbulluoglu et al., 2002; Giannoni et al., 2005; Hancock e Evans, 2006*), nel nostro caso viene stimata secondo la procedura proposta da *Tarboton and Ames (2001)*.

Una volta ottenute le matrici delle *FD*, delle *CA* ed il reticolo di drenaggio per i tre casi a) b) e c), viene effettuata la caratterizzazione idrogeomorfologica del DEM ossia vengono stimati i seguenti parametri:

- Rapporti di biforcazione, delle lunghezze e delle aree (rapporti hortoniani o HP)
- Lunghezza dell'asta di ordine massimo (L_{Ω}), in Km
- Lunghezza dell'asta principale del reticolo (L_{max}), in Km
- Funzione di ampiezza WF e suo massimo, $\max(WF)$, in numero di celle
- Tempo di corrivazione (T_c), in ore
- Portata di picco con la formula razionale (Q), in m^3/s
- Idrogramma e ietogramma di progetto (GIUH, Sifalda, Chicago)

6) Risultati

In Figura 3 vengono mostrati i reticoli idrografici ottenuti con la metodologia di cui al paragrafo 5) per il bacino del Rigo per i metodi a), b) e c). Viene, inoltre, riportato il reticolo idrografico reale digitalizzato dalla CTR e dalle foto aeree.

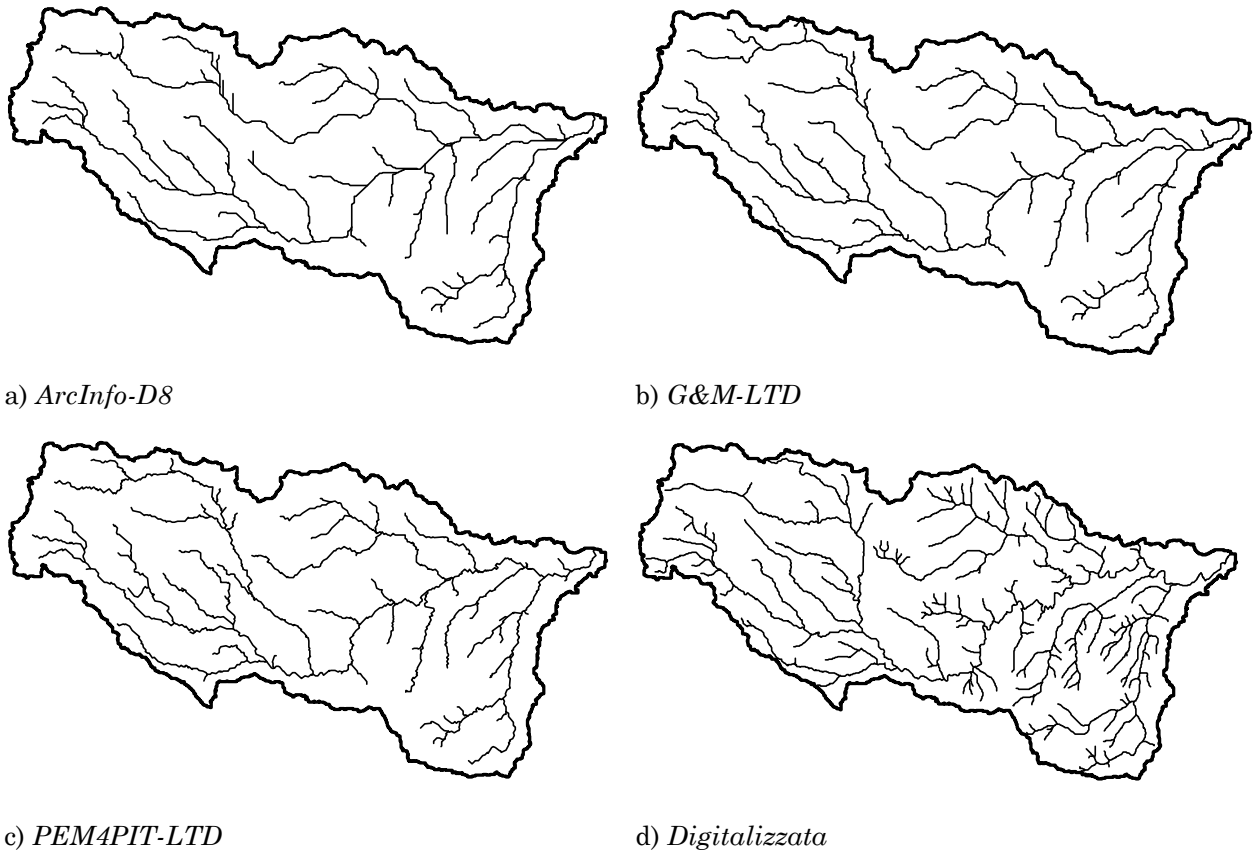


Figura 3: I reticoli idrografici estratti automaticamente (a,b,c) e il reticolo reale digitalizzato (d).

Si noti come i reticoli ottenuti siano sensibilmente differenti tra loro, in particolar modo nella parte centrale del bacino dove la metodologia *ArcInfo-D8* non riesce a ricostruire il reale andamento del reticolo idrografico a causa della presenza di ampie zone pianeggianti. Tali differenze si ripercuotono anche a scala di bacino, come risulta dalla Tabella 2, dove si riportano l'ordine massimo del bacino, i parametri Hortoniani R_b (rapporto di biforcazione) R_l (rapporto delle lunghezze) ed R_a (rapporto delle aree) (*Horton, 1945; Strahler, 1957*), la lunghezza dell'asta di ordine massimo (L_Ω , in Km), la lunghezza dell'asta principale del reticolo idrografico (L_{max} , in Km), la pendenza dell'asta principale (i_a), la lunghezza massima della funzione d'ampiezza (L_{maxWF} , in Km) ossia il punto più lontano, dal punto di vista idrologico, dalla sezione di chiusura nel bacino e i tempi di corrivazione del bacino (in ore) ottenuti tramite alcune delle formule più utilizzate in letteratura (*Chow and Maidment, 1988; Moisello, 1999*); questi ultimi una volta mediati danno luogo ad un tempo di corrivazione medio (detto

Tc medio) che si prenderà successivamente a riferimento per quanto riguarda la quantificazione delle portate di piena e degli idrogrammi.

	a) ArcInfo-D8	b) G&M-LTD	c) PEM4PIT-LTD	d) Digitalizzata
Ordine massimo	4	4	4	5
R_b	4.09	3.96	3.38	3.60
R_l	3.05	2.20	1.70	2.20
R_a	5.26	3.91	3.41	4.23
L_Ω (km)	4.85	11.09	15.34	7.25
L_{max} (Km)	20.69	23.29	25.16	27.65
i_a	0.029	0.018	0.013	0.034
L_{max}WF (Km)	21.65	24.79	27.48	-
Tc - Kirpich (h)	2.65	3.53	4.25	3.12
Tc - Viparelli (h)	3.83	4.31	4.66	5.12
Tc - Giandotti (h)	4.09	4.41	4.64	4.95
Tc - Puglisi (h)	5.67	6.13	6.45	6.86
Tc - SCS (h)	4.88	5.36	5.70	6.15
Tc - Ventura (h)	6.82	8.80	10.36	6.31
Tc medio (h)	4.66	5.42	6.01	5.42

Tabella 2: Parametri riassuntivi a scala di bacino.

In Figura 4 viene riportata la *WF* o funzione di ampiezza, espressa in numero di celle, che descrive la lunghezza del percorso di drenaggio dalla sezione di chiusura. In pratica è la lunghezza della linea isocorriva. Sono riportati i tre scenari per le metodologie a), b) e c).

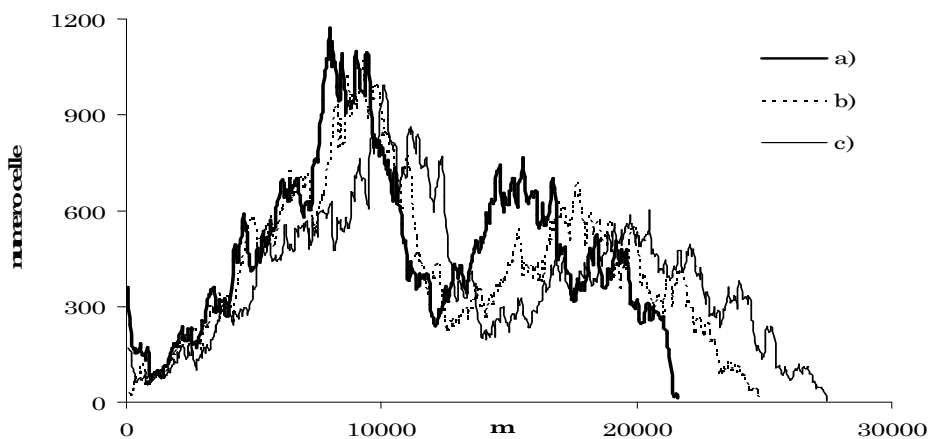


Figura 4: Le funzioni d'ampiezza (WF) estratte automaticamente: a) ArcInfo-D8, b) G&M-LTD, c) PEM4PIT-LTD; le lunghezze sulle ascisse sono riportate in classi di 50 m.

Dall'analisi della Tabella 2 (con particolare riguardo ai parametri L_{max} e $L_{max}WF$) e dall'osservazione di Figura 4 possono farsi alcune osservazioni: la ricostruzione delle direzioni di deflusso da parte delle singole metodologie utilizzate viene modificata dalla presenza di aree pianeggianti (zone critiche dove c'è una certa difficoltà intrinseca nello stimare la direzione di deflusso); in particolare l'applicazione della metodologia

standard ArcInfo-D8 produce reticoli idrografici con numerosi tratti rettilinei e/o paralleli (alcuni esempi sono mostrati in dettaglio in Figura 5) la cui conseguenza è quella di avere minori distanze dall'outlet e minori tempi di percorrenza. Al contrario l'applicazione della metodologia *PEM4PIT-LTD* produce un reticolo idrografico più meandriforme (e quindi con lunghezze maggiori) dovuto alla maggior canalizzazione del DEM corretto con PEM4PIT congruentemente con lo schema teorico utilizzato nel modello fisico erosivo nel modello.

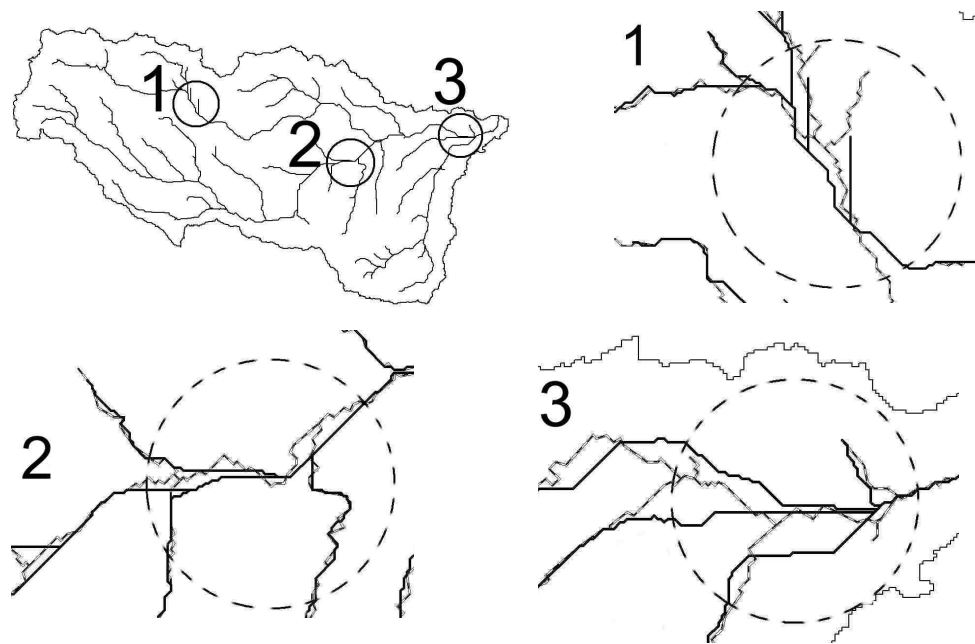


Figura 5: Alcune differenze tra i reticoli; tratto continuo: a) ArcInfo-D8; tratto bianco/nero: c) PEM4PIT-LTD.

L'impatto delle metodologie utilizzate sulla stima della portata di picco è stato analizzato considerando la formula razionale:

$$Q = \varphi i A \quad (3)$$

con Q (L^3T^{-1}) portata al colmo dell'evento meteorico (avente una durata di pioggia pari al tempo di corrvazione del bacino), φ coefficiente di deflusso, i (LT^{-1}) intensità di pioggia e A (L^2) area del bacino idrografico.

In Tabella 3 vengono riportati, per vari tempi di ritorno Tr (in anni), i risultati della Q per i tre scenari considerando un coefficiente di deflusso costante pari a 0,3. Vengono, inoltre, riportati i parametri a e n della Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica (*LSPP*) relativi all'area in esame (*Moisello*, 1999).

	a) ArcInfo-D8		b) G&M-LTD	c) PEM4PIT-LTD	d) Digitalizzata
Tr	a	n	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
10	50.93	0.424	147.44	135.03	127.27
20	59.53	0.424	172.34	157.83	148.76
30	65.22	0.424	188.81	172.92	162.98
50	73.16	0.424	211.80	193.97	182.82
100	85.51	0.424	247.55	226.71	213.69
200	99.94	0.424	289.33	264.97	249.75

Tabella 3: Esempio di LSPP ($h = a \cdot t^n$, Tempi di ritorno Tr in anni) e valori di portata di picco ottenuti tramite l'utilizzo della formula razionale.

Come si vede l'effetto sulla portata di picco è quello di un moderato aumento (fino al 16%) quando si passa da *PEM4PIT-LTD* al metodo standard *ArcInfo-D8*. Le differenze sulle portate di picco sono comunque modeste, rispetto alle diversità dei reticoli idrografici corrispondenti, in quanto la formula razionale è basata sulle LSPP che avendo un andamento di potenza con esponente minore dell'unità mediano le forti variazioni del T_c non producendo altrettanto forti variazioni dell'intensità di precipitazione.

L'influenza dei diversi metodi di trattamento dei DEM in relazione alla stima dell'idrogramma di piena è stata effettuata considerando due modelli afflussi – deflussi basati sul concetto dell'idrogramma unitario di tipo geomorfologico: a) l'idrogramma unitario istantaneo geomorfologico (*GIUH*) (*Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979; Rodriguez-Iturbe, 1993*), la cui formulazione è data da:

$$h(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{k}} \quad (4)$$

con $h(t)$ idrogramma unitario (in ore⁻¹) e t tempo; l'idrogramma dipende essenzialmente dai parametri n e k , i quali si possono mettere in relazione ai parametri Hortoniani del bacino e alla lunghezza dell'asta di ordine maggiore del reticolo, secondo le formule seguenti (*Rodriguez-Iturbe, 1993*):

$$n = 3.29Rb^{0.78} Ra^{-0.78} Rl^{0.07} \quad (5)$$

$$k = 0.70 \frac{L\Omega}{v} Rb^{-0.48} Ra^{0.48} Rl^{-0.48} \quad (6)$$

con v (LT⁻¹) velocità di deflusso all'interno del reticolo idrografico; b) il modello *GIUH* secondo la formulazione di *Gupta et al (1980)*, la quale si basa, piuttosto che sui parametri Hortoniani, sulla descrizione di tutti i possibili percorsi seguiti dall'acqua all'interno del reticolo idrografico secondo la:

$$h(t) = \sum_{s \in S} \sum_{j=1}^k C_{j,k} e^{-\lambda_{s,j} t} p(s) \quad (7)$$

dove s rappresenta il generico percorso idraulico nell'insieme S dei percorsi possibili, avente probabilità $p(s)$ di accadere, ognuno dei quali costituito da j stadi in serie, di cui il primo sempre un versante e l'ultimo il canale di ordine maggiore. I coefficienti $C_{j,k}$ dipendono fondamentalmente dalla geometria del sistema (numero e lunghezze medie dei canali di ordine generico, aree contribuenti medie dei versanti di ordine generico, secondo la classificazione di *Horton*, 1945) e da un ulteriore parametro di adattamento che è tarabile sulla base del bacino in questione e che di fatto determina la durata dell'idrogramma e la sua portata di picco.

In Figura 6 sono riportati i risultati per il GIUH di *Rodriguez-Iturbe e Valdes* (1979) ipotizzando una velocità di deflusso pari a 1,5 m/s. Si noti che le differenze marcate tra le varie metodologie adottate non dipendono tanto dai diversi valori dei parametri Hortoniani (effetti mitigati dagli esponenti a cui sono elevati), quanto piuttosto dalla stima delle lunghezze dell'asta di ordine maggiore, che si presentano sensibilmente diverse (oltre il 300%). Sempre in Figura 6 si riportano i GIUH secondo la formulazione di *Gupta et al* (1980) secondo i tre scenari possibili. In mancanza di ietogrammi e idrogrammi registrati sul bacino (e quindi nell'impossibilità pratica di risalire al tempo di ritardo del bacino stesso) il parametro di adattamento è stato tarato in modo da avere per la metodologia a) (*ArcInfo-D8*, comunemente utilizzata nella prassi) la stessa durata del GIUH della formulazione di *Rodriguez-Iturbe and Valdes* (1979), ed è stato mantenuto poi costante per le restanti metodologie. Come è evidente, l'effetto di non considerare come prioritaria la lunghezza principale, come in precedenza, ma di basarsi invece sugli effettivi percorsi seguiti dai deflussi superficiali (i cui effetti comunque si mediano, sebbene i reticoli siano tra di loro notevolmente diversi), è quello di omogeneizzare i risultati sulle portate di picco e sulle singole durate degli idrogrammi.

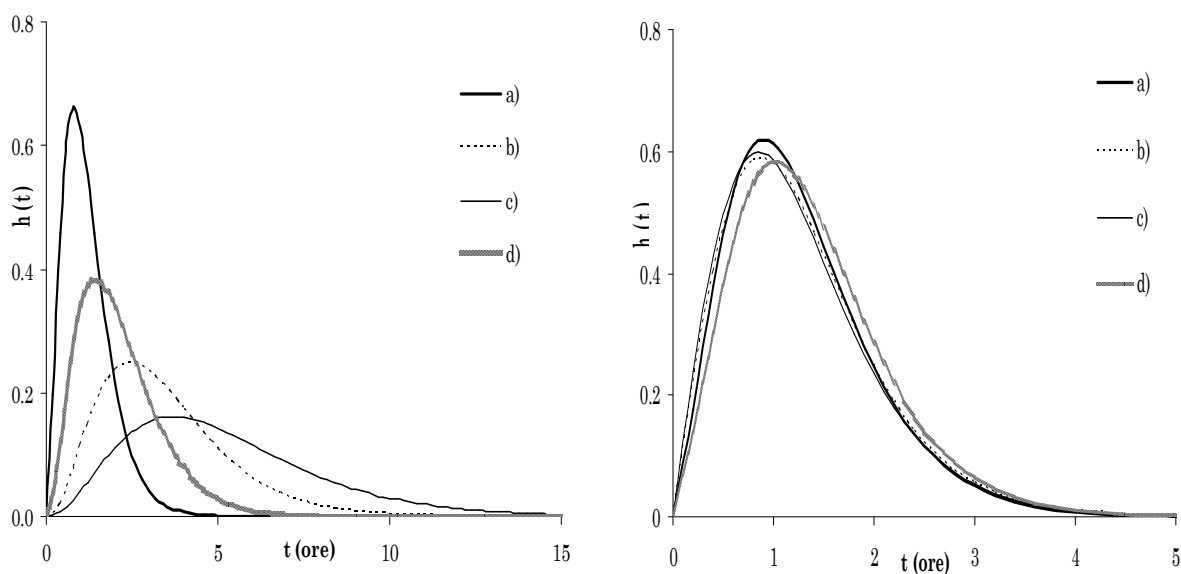


Figura 6: metodologie a) ArcInfo-D8, b) G&M-LTD, c) PEM4PIT-LTD, d) Digitalizzata: a sinistra GIUH secondo *Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979)*, a destra GIUH secondo *Gupta et al. (1980)*:

L'ultima applicazione proposta riguarda gli ietogrammi di progetto. Prendendo sempre a riferimento la *LSPP* (si veda Tabella 3), se si ipotizza di utilizzare uno ietogramma di progetto a intensità di pioggia costante i risultati sono riportati in Tabella 4, dove si mostrano, per vari tempi di ritorno Tr e per le metodologie investigate, le altezze cumulate e le intensità di pioggia, ottenute dividendo l'altezza cumulata di pioggia per il rispettivo tempo di corrivazione. Al pari del precedente utilizzo della formula razionale, anche in questo caso non si notano differenze significative (non oltre il 16%). Tale comportamento cambia al variare dello ietogramma di progetto utilizzato. Ad esempio, se si considera lo ietogramma "Sifalda" si ottengono i risultati mostrati in Figura 7. Mentre in Figura 8 si riportano i risultati relativi all'utilizzo dello ietogramma di progetto "Chicago" (avente parametro r che caratterizza la posizione del picco dell'intensità di pioggia un valore pari a 0.35 volte il tempo medio di corrivazione). Sono evidenti le differenze riguardo al picco (per il Sifalda) e alla durata (per entrambi i tipi di ietogrammi).

	a) ArcInfo-D8	b) G&M-LTD	c) PEM4PIT-LTD	d) Digitalizzata
Tr	altezza cumulata di pioggia (mm)			
10	97.8	104.3	108.9	104.3
20	114.3	121.9	127.3	121.9
30	125.2	133.6	139.5	133.5
50	140.4	149.8	156.5	149.8
100	164.1	175.1	182.9	175.1
200	191.8	204.7	213.8	204.6
Tr	intensità di pioggia (mm/ora)			
10	21.0	19.2	18.1	19.2
20	24.5	22.5	21.2	22.5
30	26.9	24.6	23.2	24.6
50	30.2	27.6	26.0	27.6
100	35.3	32.3	30.4	32.3
200	41.2	37.7	35.6	37.8

Tabella 4: Altezze cumulate e intensità di pioggia (Tempi di ritorno Tr in anni)

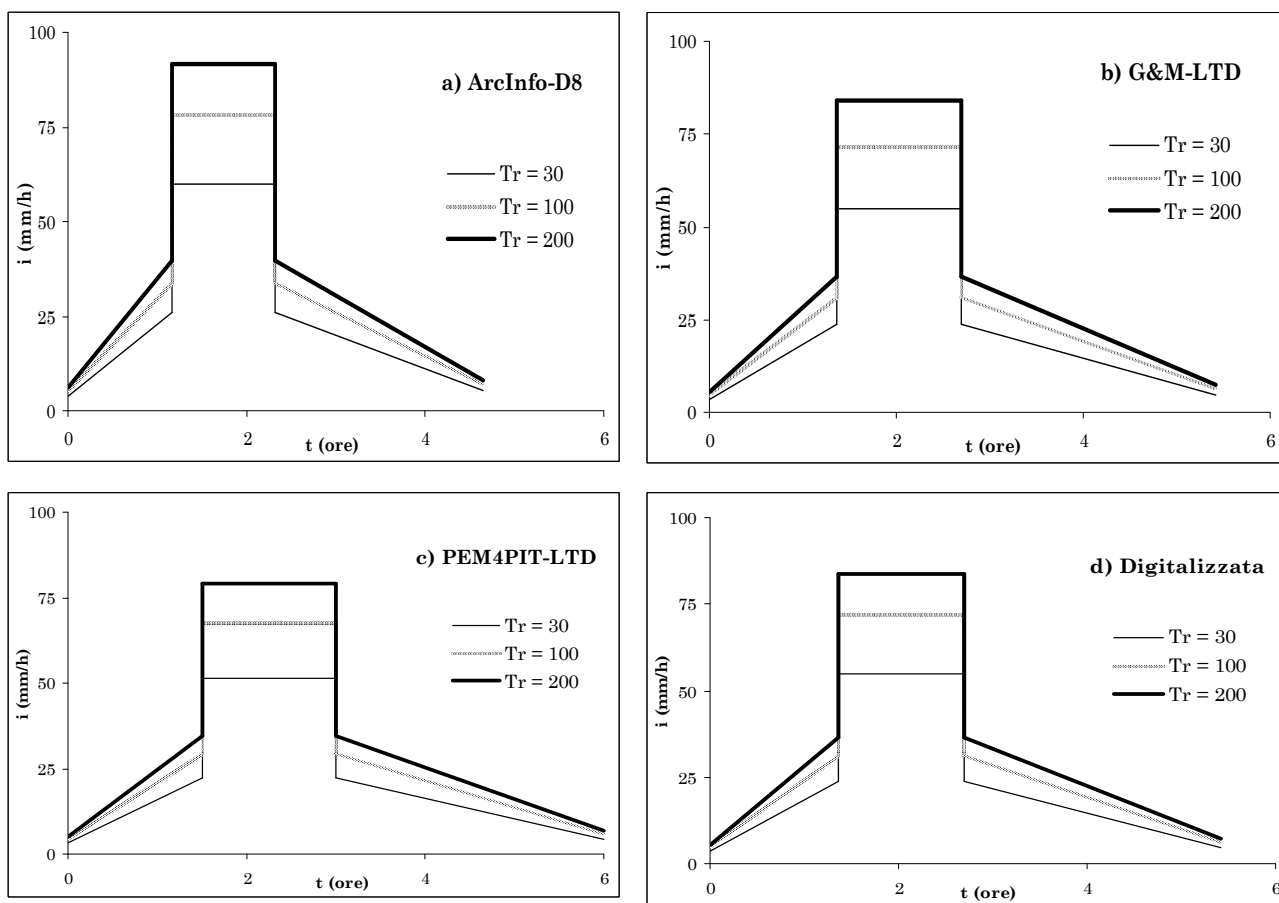


Figura 7: Ietogrammi di Sifalda.

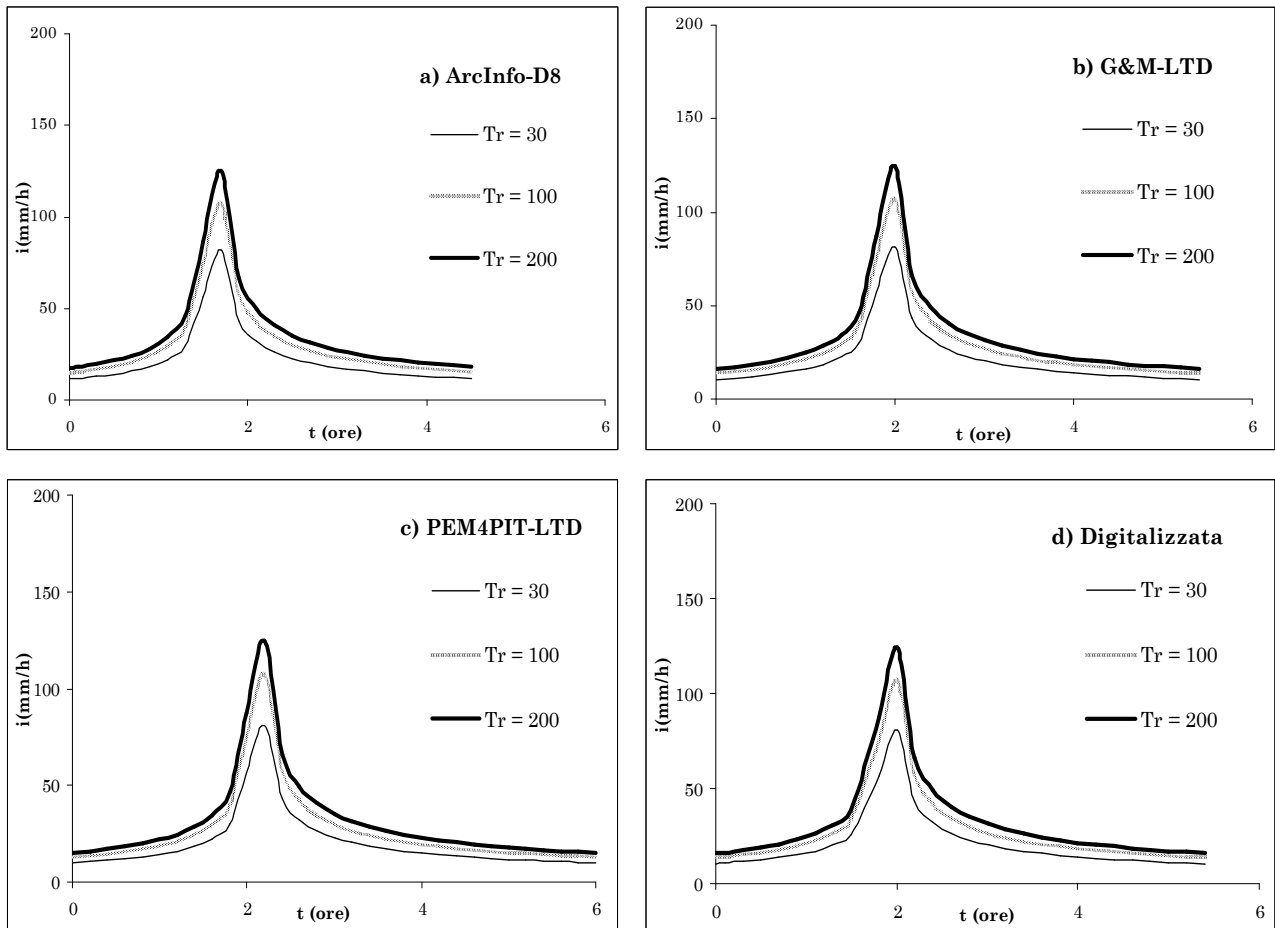


Figura 8: Ietogrammi di Chicago.

7) Conclusioni

L'estrazione automatica del reticolo idrografico a partire da un DEM solitamente si effettua applicando alcune procedure in sequenza che possono riassumersi nelle seguenti fasi: 1) preprocessamento del DEM per la rimozione di zone idrologicamente spurie (pit e aree pianeggianti); 2) identificazione delle direzioni di deflusso e delle aree contribuenti; 3) determinazione del reticolo a partire dalle aree contribuenti.

L'approccio più utilizzato, considerabile come tradizionale nella pratica comune, è *ArcInfo-D8*, basato sull'uso del metodo D8 per la determinazione delle direzioni di deflusso e abbinato ad una procedura iterativa per affrontare il problema delle aree piane. In questo lavoro si evidenzia, tuttavia, che tale procedura non soltanto fornisce reticoli idrografici con tratti estremamente rettilinei o paralleli tra loro e quindi non realistici, ma può dar luogo ad erronee stime delle grandezze idrologiche di progetto. Sono state, quindi, descritte ed applicate altre procedure, ritenute le più valide tra

quelle presenti in letteratura, quali *Orlandini-LTD* riguardo la definizione delle direzioni di deflusso, *G&M* e *PEM4PIT* riguardo l'analisi delle aree a pendenza nulla.

I risultati delle applicazioni svolte su di un sottobacino del fiume Tevere ed il confronto tra le varie tecniche descritte hanno evidenziato e confermato che, soprattutto per bacini caratterizzati da un'elevata percentuale delle aree piane, l'utilizzo delle metodologie tradizionali può comportare delle imprecisioni significative anche a livello progettuale.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito della convenzione dal titolo "Studio preliminare del rischio idraulico per i bacini idrografici del Rio Torbido, Torrente Rigo, Torrente Vezza e bacini minori inclusi nel territorio della Provincia di Viterbo", stipulata tra L'Università degli Studi della Tuscia – Dipartimento GEMINI, la Provincia di Viterbo e l'Autorità di Bacino Nazionale del Fiume Tevere. Gli Autori ringraziano sentitamente gli esponenti di entrambe le Istituzioni per la collaborazione e la disponibilità ricevute.

Bibliografia

- Beven, KJ, Kirkby MJ (1979), A physically based variable contribution area model of basin hydrology, *Hydrological Science Bulletin*, 24, 43-69.
- Burrough, P.A., (1986). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press, New York, p. 50.
- Chow V.T, Maidment D.R. (1988), *Applied hydrology*, New York : McGraw-Hill.
- Costa-Cabral, M. C., e S. J. Burges (1994), Digital elevation model networks (*DEMON*): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas, *Water Resour. Res.*, 30(6), 1681– 1692.
- Desmet, P. J. J., e G. Govers (1996), Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies, *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 10, 311– 331.
- Erskine, R. H., Green, T. R., Ramirez, J. A. & MacDonald, L. H. (2006) Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. *Water Resour. Res.* 42, W09416, doi:10.1029/2005WR004648.
- ESRI (1990), *Understanding GIS: The ArcInfo Method*, 400 pp., ESRI Press, Redlands, Calif.
- Fairfield, J., and P. Leymarie (1991), Drainage networks from grid digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 27, 709– 717.
- Freeman, T. G. (1991), Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid, *Comput. Geosci.*, 17, 413–422.
- Garbrecht, J. e L. W. Martz, (1997a), The Assignment of Drainage Direction Over Flat Surfaces in Raster Digital Elevation Models, *J. Hydrol.*, 193: 204-213.
- Garbrecht, J. e Martz L. W. (1997b). *TOPAZ: An Automated Digital Landscape Analysis Tool for Topographic Evaluation, Drainage Identification, Watershed Segmentation and Subcatchment Parameterization; TOPAZ User Manual*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grazinglands Research Laboratory, El Reno, Oklahoma, USA, ARS Publication No. GRL 97-4, 119 pp., April 1997.
- Giannoni, F., Roth, G. & Rudari R. (2005) A procedure for drainage network identification from geomorphology and its application to the prediction of the hydrologic response. *Advances In Water Resources* 28(6), 567-581.
- Grimaldi S., Nardi S, Di Benedetto F., Istanbuluoglu E., Bras R.L., (2007) A physically-based method for removing pits in digital elevation models, *Advances in Water Resources*, 30 2151–2158.
- Gupta V.K., Waymire E. e Wang, C.T., 1980. Representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resour. Res.*, 16(5): 855-862

- Hancock, G. R. e Evans, K. G. (2006) Channel head location and characteristics using digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 809–824.
- Holmgren, P., (1994), Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation, *Hydrol. Processes*, 8, 327-334.
- Horton R.E. (1945), Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 56, 275– 370.
- Istanbuloglu, E., Tarboton, D. G., Pack, R. T. e Luce, C. (2002) A probabilistic approach for channel initiation. *Water Resour. Res.* 38(12), 1325, doi:10.1029/2001WR000782.
- Jenson, S. K., e J. O. Domingue (1988), Extracting topographic structure from digital elevation models, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 54, 1593– 1600.
- Lea, N. L., (1992), An aspect driven kinematic routing algorithm, in *Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*, edited by A. J. Parsons and A. D. Abrahams, Chapman & Hall, New York.
- Lindsay, J. B. (2003), A physically based model for calculating contributing area on hillslopes and along valley bottoms, *Water Resour. Res.*, 39(12), 1332, doi:10.1029/2003WR002576.
- Lindsay, J. B. (2005), The Terrain Analysis System: a tool for hydro-geomorphic applications, *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 5, 1123-1130
- Mackay, D.S. e Band, L.E. (1998) Extraction and representation of nested catchment areas from digital elevation models in lake-dominated topography. *Water Resour. Res.* 34, 897-901.
- Mark, DM. (1988), *Network Models in Geomorphology*. Book chapter in *Modelling in Geomorphological Systems*. John Wiley.
- Martz, L. W. e De Jong, E. (1988) CATCH: a Fortran Program for Measuring Catchment Area from Digital Elevation Models. *Computers and Geosciences* 14(5), 627-640.
- Martz, LW, Garbrecht, J. (1999), An outlet breaching algorithms for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Comp Geosci*;25: 835-844.
- Moisello, U., (1999), *Idrologia Tecnica*, La Goliardica Pavese, ISBN: 8878303631
- Montgomery, D. R. e Dietrich, W. E. (1989) Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resour. Res.* 25(8), 1907–1918.
- Montgomery, D. R., e Dietrich, W. E. (1992) Channel initiation and the problem of landscape scale. *Science* 255, 826-830.
- Nardi, F., E. R. Vivoni, e S. Grimaldi (2006), Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method, *Water Resour. Res.*, 42, W09409, doi:10.1029/2005WR004155.
- Nardi, F., Grimaldi, S., Santini, M., Petroselli, A., Ubertini, L. (in review), “The Treatment of Flat Areas by DEM-based Flow Direction Methods: Comparison of Concentrated and Dispersive Algorithms in Hydrogeomorphic Applications”, *Hydrological Science Journal*.
- Neteler, M. e Mitasova, H. (2002) *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. 464 pages, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, ISBN 1-4020-7088-8.
- O’Callaghan, J. F., e D. M. Mark (1984), The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 28, 323– 344.
- Olivera F, Famiglietti J, Asante K. (2000), Global-scale flow routing using a source-to-sink algorithm. *Water Resour Res*;36(8): 2197-2207.
- Orlandini, S., G. Moretti, M. Franchini, B. Aldighieri, e B. Testa (2003), Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 39(6), 1144, doi:10.1029/2002WR001639.
- Pan, F., C. D. Peters-Lidard, M. J. Sale, e A. W. King (2004), A comparison of geographical information systems–based algorithms for computing the TOPMODEL topographic index, *Water Resour. Res.*, 40, W06303, doi:10.1029/2004WR003069.
- Pilesjo, P., Zhou, Q., e Harrie, L. (1998), Estimating flow distribution over digital elevation models using a form-based algorithm. *Geographical Information Science*, 4, 44–51.
- Quinn, P. F., Beven K. J., e R. Lamb (1995), The $\ln(a/\tan B)$ index: How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework, *Hydrol. Processes*, 9, 161– 182.
- Quinn, P. F., Beven, K. J, Chevallier, P., e Planchon, O. (1991), The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models, *Hydrol. Processes*, 5, 59– 79.
- Rodríguez-Iturbe, I., (1993). The geomorphological unit hydrograph. In: Beven, K., Kirkby, M.J. (Eds.), *Channel Network Hydrology*. Wiley, Chichester, pp. 42–68.
- Rodríguez-Iturbe, I., e A. Rinaldo (1997), *Fractal River Networks: Chance and Self-Organization*, Cambridge University Press, New York.
- Rodríguez-Iturbe, I., e J. B. Valdes (1979), The geomorphologic structure of hydrologic response, *Water Resour. Res.*, 15(6), 1409–1420.

- Strahler A.N. (1957), Quantitative analysis of watershed geomorphology, *Trans. Amer. Geophys. Union* 38: 913–920.
- Tarboton D.G. (1997), A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 33, 309– 319.
- Tarboton D.G, Ames D.P., (2001), Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data, in *World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida, May 20-24, ASCE.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L. e Rodriguez-Iturbe, I. (1991), On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrol. Processes* 5(1), 81– 100.
- Willgoose, G., Bras, RL, Rodriguez-Iturbe, I. (1991a) A coupled channel network growth and hillslope evolution model 1. Theory. *Water Resour Res*; 27(7): 1671-1684.
- Willgoose, G., Bras, RL, Rodriguez-Iturbe, I. (1991b) A coupled channel network growth and hillslope evolution model 2. Nondimensionalization and application. *Water Resour Res*; 27(7): 1685-1696.
- Wilson JP, Gallant JC. (2000), *Digital Terrain Analysis*. In: Wilson JP., Gallant JC, editors. Book chapter in *Terrain Analysis*. New York: Wiley.
- Wolock, D. M., e G. J. McCabe Jr. (1995), Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, *Water Resour. Res.*, 31(5), 1315–1324.
- Zhou Q., e X. Liu (2002) Error assessment of grid-based flow routing algorithms used in hydrological models, *Int. J. Geographical Information Science*, 16(8), 819–842.