

METODOLOGIE PER L'ESTRAZIONE AUTOMATICA DEL RETICOLO: CONFRONTO DEGLI EFFETTI SULLA RISPOSTA IDROLOGICA

M. Di Lazzaro¹, A. Petroselli², F. Nardi^{2,4}, M. Santini², S. Grimaldi^{2,4}

- (1) Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile, via V. Volterra 62 00146 Roma - e-mail: mdl@uniroma3.it
- (2) Università degli Studi della Tuscia, Dipartimento GEMINI, Via De Lellis snc 01100 Viterbo - e-mail: petro@unitus.it, fernando.nardi@unitus.it, salvatore.grimaldi@unitus.it
- (3) Università degli Studi della Tuscia, DISAFRI, e-mail: monia.santini@unitus.it
- (4) Centro H2CU, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, 00184 Roma, Italia

SOMMARIO

In questa memoria vengono confrontate diverse procedure per l'estrazione automatica del reticolo idrografico a partire da DEM. Sono analizzate in particolare quattro procedure derivanti dalla combinazione di due tecniche per la rimozione dei pit e di due metodi per la definizione delle direzioni di drenaggio. Il confronto è effettuato sulla base della metrica del reticolo riprodotto, ed in particolare dei momenti di primo e secondo ordine della rete di versanti e canali. Viene infine evidenziato l'effetto delle diverse tecniche sulla risposta idrologica, utilizzando l'approccio geomorfologico basato sulla funzione d'ampiezza.

INTRODUZIONE

L'impiego dei Digital Elevation Model (DEM) per l'estrazione automatica del reticolo idrografico è divenuto in tempi recenti pratica comune, rappresentando ormai lo standard per l'implementazione di modelli idrologici, idraulici e geomorfologici. In tal senso la messa a punto e l'analisi delle procedure di estrazione del reticolo idrografico è un argomento di ricerca attuale (Garbrecht & Martz, 1997b; Tarboton & Ames, 2001; Lindsay, 2003). E' noto come tali procedure possano condurre a risultati affetti da errori significativi, dovuti in parte alla struttura dei DEM, in parte alle semplificazioni insite negli algoritmi di calcolo. Numerosi studi illustrano come nei DEM sussistano elementi spuri, dal punto di vista idrologico, quali depressioni artificiali, versanti planari e zone a pendenza nulla (O'Callaghan & Mark, 1984; Martz & Garbrecht, 1998), che in particolari condizioni impediscono la corretta stima dei gradienti locali di quota e, di conseguenza, delle variabili morfometriche e idrologiche.

Due procedimenti in particolare si rivelano critici ai fini della stima dei percorsi di scorrimento: (i) la definizione del reticolo nelle aree pianeggianti, specie qualora risulti necessario applicare delle procedure per la rimozione dei *pit*, (celle interamente circondate da altre a quota superiore) e (ii) il metodo di assegnazione della direzione locale di drenaggio (nel seguito FD, Flow Direction). Riguardo al primo aspetto, spesso le aree completamente pianeggianti derivano da artifici numerici quali i metodi di interpolazione ed adattamento alla griglia, l'effetto del troncamento del dato e le

problematiche inerenti le tecniche di acquisizione. Ancora più frequentemente la significativa presenza di aree piane è un effetto della rimozione dei pit (*Jenson and Domingue, 1988*) effettuata attraverso il riempimento delle depressioni e la formazione di “laghetti” interni (metodo flooding). L’impatto di tali procedure nei DEM di più comune utilizzo è significativa, e tale da poter inficiare il loro utilizzo nella modellazione idrologica (*Nardi et al., in review*).

Il secondo aspetto saliente è costituito dalla stima della FD, definita come la direzione della tangente alla superficie topografica lungo la linea di massima pendenza. Per semplicità di calcolo la FD è solitamente approssimata con una delle otto direzioni cardinali o diagonali (*Jenson & Domingue, 1988; Tarboton, 1997*) e indicata in genere come Theoretical Flow Direction (TFD). L’approccio più semplice ipotizza che l’acqua si muova dalla cella di monte alla cella di valle senza dispersione; in tal caso si parla di metodi Single Flow Direction o SFD (*O’Callaghan & Mark, 1984; Garbrecht & Martz, 1997a; Orlandini et al., 2003*). Questa ipotesi, del tutto accettabile per i deflussi di tipo canalizzato nelle zone vallive a curvatura positiva, risulta discutibile sui versanti ove prevalgono fenomeni diffusivi. I metodi SFD hanno tuttavia l’indubbio vantaggio di restituire un reticolo idrografico continuo, e per questo sono lo standard nell’estrazione della rete, mentre ai fini della quantificazione di altri parametri geomorfologici (es: *wetness index*) vengono utilizzati metodi che consentono il frazionamento della massa verso più celle, detti Multi Flow Direction methods o MFD (si vedano ad esempio *Freeman, 1991, Quinn et al., 1991 e Tarboton, 1997*).

Considerazioni sviluppate recentemente in letteratura - *Erskine et al. (2006), Desmet and Govers (1996)* – evidenziano la mancanza di analisi sistematiche in merito agli effetti dei diversi metodi per la ricostruzione del reticolo idrografico.

Nella presente memoria si propone un’analisi di tipo quantitativo per confrontare la combinazione di due metodi di correzione dei *pit* (classica procedura di tipo flooding di ARC-INFO ottenuta tramite l’applicazione del comando *FILL* [ESRI, 1990] e metodo PEM4PIT [*Grimaldi et al., 2007*]) e di due procedure SFD (metodo ARC-INFO D8 [*O’Callaghan and Mark, 1984; Jenson and Domingue, 1988*] e metodo LTD [*Orlandini et al., 2003*]) in relazione all’estrazione del reticolo di drenaggio. Viene inoltre quantificato l’effetto che l’applicazione delle diverse procedure induce sulla risposta idrologica. Il primo criterio di confronto è basato sulle variazioni osservate della metrica del reticolo, stimate attraverso l’analisi delle componenti di versante e di canale del reticolo idrografico. Il secondo tipo di confronto si basa sull’analisi della distribuzione dei tempi di arrivo definita tramite l’approccio della cosiddetta funzione d’ampiezza riscalata (*Rinaldo et al., 2005*) in funzione del rapporto tra velocità di canale e di versante.

MOMENTI DELLA DISTRIBUZIONE DEI PERCORSI E DEI TEMPI DI ARRIVO

Il confronto delle diverse procedure di analisi dei DEM è stato inquadrato nel contesto della teoria dell’Idrogramma Istantaneo Geomorfologico (GIUH) introdotto da *Rodriguez-Iturbe & Valdes (1979)* e successivamente formalizzato da *Rinaldo & Rodriguez-Iturbe (1996)*. L’ipotesi alla base di questo approccio è l’equivalenza tra l’IUH e la densità di probabilità dei tempi di arrivo delle particelle d’acqua da ciascun punto del bacino. Nell’impostazione originale tale probabilità è espressa adottando l’ordinamento topologico di Strahler. L’impiego di un criterio metrico nella descrizione

del bacino mediante l'utilizzo della funzione d'ampiezza (Kirkby, 1976) risale invece a Mesa & Mifflin (1986) ed è quello considerato nel presente lavoro. Il confronto diretto delle combinazioni dei diversi metodi (metodi per la rimozione dei *pit* e metodi SFD per la direzione di drenaggio) è stato impostato, in particolare, sulla valutazione dei momenti di primo e secondo ordine della distribuzione delle lunghezze di versante e canale.

La definizione dei percorsi idraulici risultanti dalla combinazione delle procedure confrontate permette di quantificare, per ogni sezione di chiusura: la media delle lunghezze di versante $\langle L_h \rangle$; la media delle lunghezze di canale $\langle L_c \rangle$; la varianza delle lunghezze di versante $var(L_h)$; la varianza delle lunghezze di canale $var(L_c)$ e la loro covarianza $Cov(L_h, L_c)$

A partire da queste grandezze è inoltre possibile la derivazione analitica dei momenti di primo e secondo ordine della distribuzione dei tempi di arrivo; l'impostazione seguita è quella definita da Saco & Kumar (2004) e D'Odorico & Rigon (2003), ma generalizzata rilassando l'ipotesi che le lunghezze di versante e di canale non siano correlate. La formulazione convettiva-diffusiva del trasporto viene inoltre sostituita da una puramente convettiva seguendo i risultati di Rinaldo et al. (1991) e Botter & Rinaldo (2003) sul ruolo relativo della dispersione idrodinamica e della dispersione geomorfologica.

Assegnato il valore della velocità di canale, la distribuzione dei tempi di arrivo e i suoi momenti possono essere espressi in funzione del rapporto θ tra u_c , velocità nel canale, e u_h , velocità sul versante. Il tempo medio di residenza per l'intero bacino (primo momento del GIUH) è così espresso come

$$\langle T \rangle = E(t) = \int_0^{L_{cmax}} p_c(L_c) \int_0^{L_{hmax}} p(L_h | L_c) \left(\frac{L_h}{u_h} + \frac{L_c}{u_c} \right) dx_h dx_c = \frac{\langle L_c \rangle}{u_c} + \frac{\langle L_h \rangle}{u_h} \quad (1)$$

Dove L_{hmax} e L_{cmax} sono le massime distanze rispettivamente su versante e canale, $p(L_c)$ è la probabilità che una particella d'acqua segua il canale di lunghezza L_c e $p(L_h | L_c)$ è la probabilità che un percorso abbia lunghezza L_h quando la sua lunghezza di canale è L_c . Abbandonando l'assunzione di completa indipendenza statistica tra canali e versanti la varianza dei tempi di arrivo risulta quindi espressa da

$$var(T) = \frac{1}{u_c^2} [var(L_c) + \theta^2 var(L_h) + 2\theta cov] \quad (2)$$

Il terzo termine della (2) tiene conto dell'effetto dispersivo legato alla covarianza tra versanti e canali, recentemente introdotto (Di Lazzaro, in review). Nell'ambito dei rapporti fisicamente plausibili per θ , tale contributo alla varianza dei tempi di arrivo può assumere valori significativi in relazione alle caratteristiche fisiche del bacino.

MATERIALI E METODI

Per quanto riguarda i metodi di rimozione dei *pit* sono stati presi in considerazione due approcci:

1) il metodo implementato nel software ARC-INFO (ESRI, 1990). Esso procede ad un innalzamento iterativo di tutte le celle depresse finché non sia eliminata la presenza di *pit* residui. Tale metodo, come è ovvio, produce nel DEM un incremento di aree a

pendenza nulla, sulle quali c'è ancora il problema di stimare una FD. Nel seguito tale metodo verrà richiamato con il termine "FILL";

2) Il secondo metodo considerato è una tecnica recente fisicamente basata, detta PEM4PIT, acronimo di 'Physical Erosion Model for Pit Removal' (Grimaldi *et al.*, 2007). Secondo tale approccio l'elevazione delle celle viene modificata per imporre sulla topografia pendenze non nulle. Esso è fondato sull'implementazione dell'equazione di equilibrio dinamico dei bacini idrografici (Willgoose *et al.*, 1991a, 1991b) secondo il quale il sovralzamento tettonico è in equilibrio con la dinamica dei processi erosivi e diffusivi. Il PEM4PIT identifica e modifica 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. Nel seguito tale metodo verrà richiamato con il termine "P4P".

Per quanto riguarda invece la determinazione delle FD, successiva alla rimozione dei *pit*, sono state selezionate e poste a confronto due tecniche entrambe di tipo SFD. Esse sono:

1) il metodo detto D8 (O'Callaghan & Mark, 1984; Jenson & Domingue, 1988) basato sull'approssimazione della TFD secondo lo schema ad otto direzioni possibili e la concentrazione dei deflussi senza dispersione laterale. E' un metodo ampiamente utilizzato nella pratica idrologica e implementato nei più diffusi software di analisi (ESRI, 1990). Nel caso di aree piane (derivanti dalla rimozione dei *pit*) si procede all'identificazione della più probabile cella di sbocco (outflow) della zona pianeggiante e all'assegnazione a ritroso di una FD alle celle adiacenti, corrispondente alla direzione che punta la cella di outflow. Tale metodo, come è noto, può produrre tuttavia percorsi di drenaggio non realistici caratterizzati da tratti a pettine con direzioni di deflusso rettilinee e parallele. Nel seguito tale metodo verrà richiamato con il termine "D8";

2) il metodo recentemente proposto da Orlandini *et al.* (2003), basato sull'approssimazione della TFD secondo la più vicina delle 8 faccette triangolari, proposte originariamente da Tarboton (1997); tale metodo presenta il duplice vantaggio di essere privo di dispersione laterale, e di essere basato sul criterio di minimizzazione della 'deviazione 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. Nel seguito tale metodo verrà richiamato con il termine "LTD".

Tali metodi ovviamente si combinano tra loro dando luogo agli scenari FILL+D8, FILL+LTD, P4P+D8, P4P+LTD, per ognuno dei quali viene estratto un reticolo seguendo la procedura di Tarboton & Ames (2001).

Il caso di studio esaminato è quello del bacino del torrente Rio Chiaro (in codice VT1) alla sezione di confluenza con il Fiume Tevere (confine tra le Province di Viterbo e di Terni). Il Bacino sottende un'area di 36.87 Km² e possiede un'asta principale della lunghezza di 18.75 Km. Nella figura 1 è rappresentato lo spartiacque del bacino e la ricostruzione del reticolo; per chiarezza grafica sono indicate solo quelli derivanti dalla combinazione delle procedure FILL+LTD e P4P+LTD.

RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati ottenuti, relativi ai momenti geomorfologici calcolati, sono riportati in tabella 1. Nel complesso i dati evidenziano quanto segue:

- I due metodi di definizione della direzione di drenaggio (*D8* e *LTD*) non si differenziano in maniera significativa dal punto di vista dei risultati metrici dopo la correzione del DEM operata dal PEM4PIT. Differenze maggiori invece si riscontrano dopo l'applicazione del *FILL*, in particolare nelle lunghezze medie di canale: ciò è dovuto non solo al diverso modo di operare dell'algoritmo *LTD* rispetto al *D8*, ma anche alla possibilità del primo di risolvere le eventuali aree piane introducendo una pendenza non nulla ai fini della stima della *FD* (Orlandini *et al.*, 2003), permettendo di ricostruire un reticolo più meandriforme e realistico.
- Al contrario, i due metodi per la rimozione dei *pit* (*FILL* e *P4P*) si differenziano decisamente in relazione al calcolo numerico dei momenti di primo ordine, e, ancor più, di secondo ordine. Tale risultato è confermato sia che venga applicato il metodo *D8* sia che venga applicata la procedura *LTD*. In particolare, l'applicazione della procedura PEM4PIT sembra condurre a percorsi di versante più articolati rispetto alla classica procedura di pit filling di ARC-INFO, così che le lunghezze medie di versante e la loro varianza risulta sistematicamente maggiore.

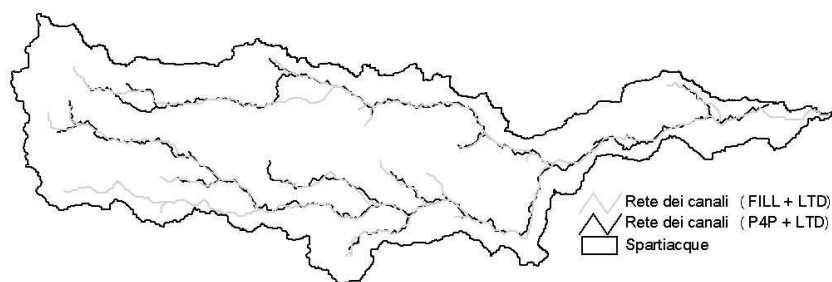


Figura 1. Bacino del torrente Rio Chiaro. Sono mostrati i reticoli estratti accoppiando le procedure *FILL + LTD* e *PEM4PIT + LTD*.

METODO RIMOZIONE PIT	FILL	FILL	P4P	P4P
Metodo FLOWDIR	D8	LTD	D8	LTD
L_c [m]	10884	11577	11550	11565
L_h [m]	443	442	497	497
$var(L_c)$ [m ²]	2.0823E+07	2.3199E+07	2.5997E+07	2.5991E+07
$var(L_h)$ [m ²]	104295	107691	147289	147105
Cov [m ²]	221359	161647	242605	240185
$\rho(L_h, L_c)$	0.150	0.102	0.124	0.123
D_G	943	983	1105	1103

Tabella 1. Bacino del torrente Rio Chiaro. Momenti geomorfologici, valori del coefficiente di correlazione tra versanti e canali e dispersione geomorfologica.

Questo si traduce in un incremento della dispersione geomorfologica complessiva, (Rinaldo, 1991) i cui valori sono indicati nell'ultima riga della tabella 1, assunta una velocità di bacino unitaria. Tale incremento, sebbene contenuto, ha tuttavia effetti importanti sulla risposta idrologica. Considerando infatti che l'ordine di grandezza del rapporto θ tra velocità di canale di versante può avere ordine di grandezza pari a 100 (Emmett, 1978; Rinaldo *et al.*, 2005; Di Lazzaro e Calenda, 2006; Di Lazzaro, in stampa) l'incremento della lunghezza dei percorsi di versante e della loro varianza

genera un aumento del tempo di ritardo e un termine addizionale alla dispersione dell'idrogramma che risultano significativi. In figura 2 viene riportato l'andamento del tempo di ritardo e della varianza dei tempi di arrivo in funzione del rapporto θ , avendo assunto una velocità di canale unitaria. In corrispondenza di un valore di θ pari a 100, ad esempio, l'incremento del tempo di ritardo utilizzando la procedura PEM4PIT per il bacino VT1 appare di quasi due ore (+11%). Più significativo ancora è l'incremento della varianza e della dispersione geomorfologico-cinematica complessiva (Saco & Kumar, 2004), che sfiora il 40%. L'incremento della varianza dei tempi di arrivo $\sigma'^2(T)$ può essere quantificato come

$$\sigma'^2(T) = \frac{1}{u_c^2} [\theta^2 \sigma'^2(L_h) + 2\theta \sigma'^2(L_h, L_c)] \quad (3)$$

dove $\sigma'^2(L_h)$ è l'incremento di varianza di versante introdotto dal metodo PEM4PIT mentre $\sigma'^2(L_h, L_c)$ è la relativa variazione della covarianza tra lunghezze di versante e di canale. Nell'espressione (3) si è trascurato il termine legato alla varianza delle lunghezze di canale, dal momento che le sue variazioni sembrano, nel complesso, contenute, e meno importanti agli effetti idrologici poiché non moltiplicate per il fattore θ .

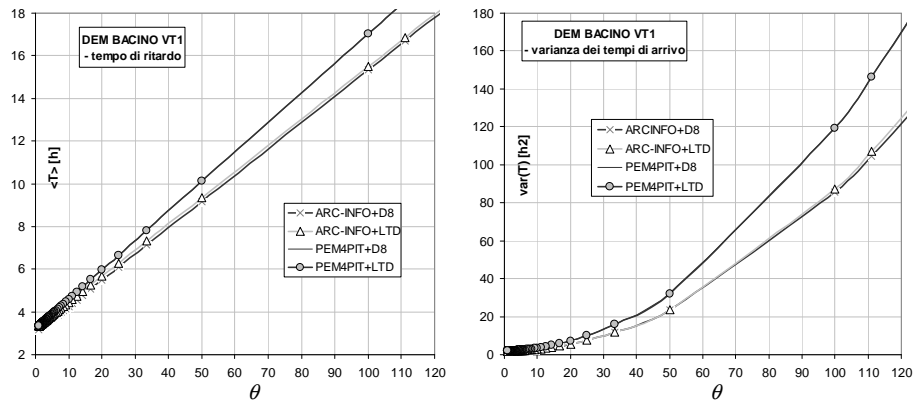


Figura 2. Andamento del tempo di ritardo e della varianza dei tempi di arrivo al variare del fattore θ per il bacino del torrente Rio Chiaro. Sono confrontate le quattro tecniche di estrazione del reticolo. I risultati si differenziano solo in relazione al metodo di rimozione dei pit, mentre le curve relative a diverse procedure di determinazione della FD risultano sovrapposte.

CONCLUSIONI

Nella memoria vengono confrontate le combinazioni tra due metodologie largamente impiegate rispettivamente per la rimozione dei *pit* e l'elaborazione della direzione di drenaggio (metodo ARC-INFO del pit filling e metodo D8) e due procedure introdotte di recente con lo stesso scopo (metodo LTD e PEM4PIT). Il confronto tra i diversi metodi è stato affrontato nel contesto geomorfologico basato sulla funzione d'ampiezza. I parametri di confronto sono stati i momenti di primo e secondo ordine

delle lunghezze di canale e versante, e i momenti di primo e secondo ordine dell'IUH generato.

L'applicazione ad un bacino nell'Italia centrale ha mostrato che i metodi *LTD* e *D8* non differiscono significativamente dal punto di vista della metrica risultante del reticolo, per quanto possono presentarsi notevoli differenze locali dovute al diverso trattamento delle aree piane, dove la procedura *LTD* ha il vantaggio di modificare temporaneamente le altimetrie per imporre pendenze non nulle ai fini della stima della FD, in modo da ricostruire un reticolo più meandriforme e realistico. Al contrario, nel bacino in esame il metodo PEM4PIT fornisce nel complesso lunghezze simili al metodo ARC-INFO per quanto riguarda la parte canalizzata del bacino, mentre i percorsi su versante e la loro varianza risultano generalmente più estesi.

Questo effetto, attribuibile ad una ricostruzione più realistica dei percorsi idraulici sui versanti con piccoli gradienti di quota, conferma l'adeguatezza del metodo alla sua applicazione alle aree pianeggianti, dove altre procedure cadono in difetto. Si è proposta infine una relazione per stimare l'incremento di dispersione introdotto dal metodo PEM4PIT come funzione del rapporto θ tra velocità di canale e di versante. Tale relazione mostra come nel campo dei valori fisicamente plausibili per θ , l'incremento di dispersione possa risultare significativo nel calcolo dell'IUH con il metodo della funzione d'ampiezza.

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 Veza 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

- Botter, G., and A. Rinaldo. 2003. Scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion, *Water Resour. Res.*, 39(10), 1286, doi:10.1029/2003WR002154
- D'Odorico, P. and R. Rigon. 2003. Hillslope and channel distributions to the hydrologic response, *Water Resour. Res.*, 39(5), 1113, doi:10.1029/2002WR001708
- Desmet, P. J. J., and 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.
- Di Lazzaro M., Stima delle velocità di trasferimento nel modello geomorfologico basato sulla funzione d'ampiezza, in stampa su *L'Acqua*, 3/2008
- Di Lazzaro, M., Correlation between hillslope and channel lengths and its effects on the hydrologic response, *Journal of Hydrology*, Manuscript number hydrol6538, in review.
- Di Lazzaro, M. e G. Calenda. La valutazione dei parametri cinematici nei modelli geomorfologici basati sulla funzione d'ampiezza", in *Atti del XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Roma, settembre 2006
- Emmet, W. W. 1978. Overland flow. In *Hillslope Hydrology*, edited by M. J. Kirkby, pp. 145–176, Wiley-Interscience, New York, 1978.
- 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.
- Freeman, T. G. (1991), Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid, *Comput. Geosci.*, 17, 413–422.
- Garbrecht, J. and L. W. Martz, (1997a), The Assignment of Drainage Direction Over Flat Surfaces in Raster Digital Elevation Models, *J. Hydrol.*, 193: 204-213.
- Garbrecht, J. and 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.
- Grimaldi S., Nardi S, Di Benedetto F., Istanbuluoglu E., Bras R.L., A physically-based method for removing pits in digital elevation models, In *Advances in Water Resources*, 30 (10), p.2151-2158, Oct 2007.
- Jenson, S. K., and J. O. Domingue (1988), Extracting topographic structure from digital elevation models, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 54, 1593–1600.
- Kirkby M. J. 1976. Tests of the random model and its application to basin hydrology, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1, 197-212.
- Lindsay, J. B., A physically based model for calculating contributing area on hillslopes and along valley bottoms, *Water Resour. Res.*, 39(12), doi:10.1029/2003WR002576, (2003)
- Martz, L.W. and Garbrecht, J. (1998). The Treatment of Flat Areas and Depressions in Automated Drainage Analysis of Raster Digital Elevation Models. *Hydrological Processes*, 12, 843-855.
- Mesa, O. J., and E. R. Mifflin (1986), On the relative role of hillslope and network hydraulic geometry in hydrologic response, in *Scale Problems in Hydrology*, edited by V. K. Gupta, I. Rodriguez-Iturbe, and E. F. Wood, pp. 1–17, D. Reidel, Norwell, Mass.
- Nardi F., Grimaldi S., Santini M., Petroselli A., Ubertini L., The Treatment of Flat Areas by DEM-based Flow Direction Methods: Comparison of Concentrated and Dispersive Algorithms in Hydrogeomorphic Applications, *Hydrological Science Journal*, in review
- O’Callaghan, J. F. and D. M. Mark. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 28 328-344
- Orlandini, S., G. Moretti, M. Franchini, B. Aldighieri, and B. Testa (2003), Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models, In *Water Resour. Res.*, 39(6), 1144, doi:10.1029/2002WR001639.
- Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier, and O. Planchon, 1991, The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models, *Hydrol. Processes*, 5, 59–79.
- Rinaldo, A., A. Marani and R. Rigon, 1991. Geomorphological dispersion, *Water Resour. Res.*, 27 (4) 513-525
- Rinaldo, A., and I. Rodriguez-Iturbe, 1996, Geomorphological theory of the hydrological response, *Hydr. Process.*, 10, 803-829
- Rinaldo, A., G. Vogel, R. Rigon and I. Rodriguez-Iturbe. 1995. Can one gauge the shape of a basin?, *Water Resour. Res.*, 31, 1119-1127
- Rodriguez-Iturbe, I., J. B. Valdes. 1979a. The geomorphologic structure of the hydrologic response, *Water Resour. Res.*, 15 (6), 1409-1420
- Saco, P. M., and P. Kumar. 2004. Kinematic dispersion effects of hillslope velocities, *Water Resour. Res.*, 40,
- Tarboton, D. G., R. L. Bras and Rodriguez-Iturbe I. 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrol. Processes*, 5, 81-100
- 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.
- 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.