



IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria
Ischia Porto, 12-16 settembre 2009
memoria n.

MODELLO AFFLUSSI – DEFLUSSI WFIUH: METODOLOGIA INNOVATIVA PER L'APPLICAZIONE IN BACINI NON STRUMENTATI

A. Petroselli¹, F. Nardi², M. Santini³, S. Grimaldi^{1,2}

- (1) Dipartimento GEMINI, Università degli Studi della Tuscia, via S. Camillo de Lellis snc, Viterbo, 01100, Italy
- (2) Honors Center of Italian Universities (H2CU), University of Rome La Sapienza, via Eudossiana 18, Rome 00184, Italy
- (3) Dipartimento DISAFRI, Università degli Studi della Tuscia, via S. Camillo de Lellis snc, Viterbo 01100, Italy

SOMMARIO

Il modello afflussi - deflussi di tipo WFIUH (Width Function Instantaneous Unit Hydrograph) si basa sulla determinazione della Funzione d'Ampiezza o Width Function (WF), ovvero sia la distribuzione dei punti aventi la stessa distanza idrologica dall'outlet. La Funzione d'Ampiezza (definita tramite supporto topografico digitale, DEM: Digital Elevation Model), riscalata rispetto alle velocità con cui il deflusso avviene sulle singole, fornisce la distribuzione dei tempi di arrivo all'outlet e quindi l'idrogramma unitario istantaneo del bacino (IUH). Per quanto il metodo sia stato ben sviluppato in letteratura ha incontrato difficoltà nella fase applicativa soprattutto a causa della determinazione delle velocità di deflusso. Tali velocità, infatti, sono assunte costanti nelle celle di tipo canale e nelle celle di tipo versante, non considerando quindi la variabilità spaziale del fenomeno. Inoltre si è verificato esse siano dei parametri di calibrazione del modello non desumibili da ipotesi di natura fisica. Scopo di questo lavoro è considerare la distribuzione spaziale delle velocità di deflusso sul terreno, proponendo e testando una metodologia speditiva per il calcolo delle velocità di deflusso per poter così calibrare il modello in bacini idrografici "poco strumentati" per i quali non sono disponibili misure contemporanee di precipitazione e portata.

Parole chiave: WFIUH, DEM, afflussi-deflussi

1 INTRODUZIONE

Recenti sviluppi nel monitoraggio da sensore remoto si stanno dimostrando particolarmente utili nel campo delle applicazioni idrologiche. Numerosi modelli digitali del terreno (DEM) e alcuni modelli digitali di superficie (DSM) ad alta risoluzione sono già a disposizione della comunità scientifica (si veda ad esempio *OpenTopography Portal*; *LIDAR/ALSM*; *WAGDA*). Questi modelli forniscono utili informazioni riguardanti le quote altimetriche, le proprietà morfologiche, del suolo e della vegetazione. La propagazione idraulica delle piene è forse l'applicazione

idrologica che più trae vantaggio da questi tipi di dati. Infatti modelli bidimensionali (come *FLO-2D*; *MIKE21*; *SRH-2D*) vengono già frequentemente applicati su DEM ad alta risoluzione allo scopo di definire le zone a rischio idraulico nelle aree golenali, con risultati molto positivi (si veda *Bates et al*, 2003; *Cobby et al*, 2003; *Sanders*, 2007).

E' quindi sempre più importante stimare correttamente l'onda di piena di progetto per piccoli bacini, rappresentando l'input da propagare idraulicamente nel reticolo Hortoniano di ordine maggiore.

Scopo del presente lavoro è dunque focalizzare l'attenzione sulla stima delle portate di progetto per piccoli bacini (fino al quarto, quinto ordine) di ridotte estensioni (minori di 150 Km²), i quali hanno in comune lo stesso problema tecnico: sono "praticamente" non strumentati, nel senso che osservazioni di portata, necessarie per la calibrazione dei modelli afflussi-deflussi, sono sicuramente non disponibili.

In questo contesto si ritiene utile far riferimento alla famiglia dei modelli dell'Idrogramma Unitario Istantaneo di tipo Geomorfologico (*Rodriguez-Iturbe & Valdes*, 1979; *Gupta et al.*, 1980; *Rodriguez-Iturbe et al.*, 1982; *Mesa & Mifflin*, 1986; *Naden*, 1992). Tra di essi risulta particolarmente interessante l'Idrogramma Unitario Istantaneo basato sulla Width Function o Funzione d'Ampiezza (WFIUH), il quale ottimizza l'informazione morfologica desumibile dal DEM disponibile. Il WFIUH, al pari di altri modelli afflussi-deflussi basati sulla teoria dell'Idrogramma Unitario Istantaneo (IUH o UH, come proposto per la prima volta da *Sherman*, 1932), ipotizza la linearità e stazionarietà del bacino e permette di ricostruire la portata di piena in una certa sezione di chiusura utilizzando la ben nota convoluzione dell'IUH con la precipitazione netta in ingresso (per una completa descrizione si veda *Chow et al.*, 1988).

Appare evidente che nell'applicazione del WFIUH il concetto di WF assume importanza cruciale. La WF è definita come la funzione di densità di probabilità delle distanze dall'outlet, ottenuta dividendo il numero delle celle ad una certa distanza idrologica dall'outlet per il totale delle celle del bacino.

La WF si ottiene facilmente utilizzando i comuni algoritmi di individuazione della direzione di deflusso a partire dal DEM, ma per ricavare la distribuzione dei tempi di arrivo all'outlet (cioè l'IUH) devono essere stabilite due variabili: la velocità nei canali (*V_c*) e nei versanti (*V_h*).

In questo lavoro ci si riferirà alla WF espressa in termini di lunghezze come 'Flow Length' (FL), mentre alla WF espressa in termini temporali ci si riferirà come 'Flow Time' (FT), in modo che in conclusione la FT rappresenti l'IUH.

Alcuni miglioramenti possono ottenersi considerando la variabilità spaziale delle velocità sui versanti. Le velocità nei canali infatti sono in genere supposte invarianti lungo tutto il reticolo, conseguentemente all'ipotesi di *Leopold & Maddock* (1953) secondo la quale gli incrementi nelle velocità nei canali dovute agli incrementi di area contribuente sono bilanciate dai cambiamenti della larghezza, della profondità, della scabrezza e della pendenza dell'alveo. Tale ipotesi si ritiene possa essere accettata in particolare per piccoli bacini. Al contrario, le velocità nei versanti variano di molto con la lunghezza del versante, con la profondità del tirante idrico, con l'uso del suolo e con altre proprietà geomorfologiche del versante (*Dunne*, 1978; *Gyasi-Agyei et al.*, 1996).

Partendo da questa considerazione, in alcuni recenti lavori si è investigata la variabilità delle velocità sui versanti e la FL viene riscalata di conseguenza (*Maidment et al*, 1996; *Botter & Rinaldo*, 2003; *Liu et al.*, 2003; *Noto & La Loggia*, 2007).

In questo lavoro si presenta l'applicazione del WFIUH in cui le velocità variabili sul versante sono definite utilizzando lo schema proposto da *Maidment et al* (1996) che presenta il vantaggio di stimare la FT con un solo parametro. Si testa quindi il modello su alcuni casi di studio tarando l'unica variabile cinematica con dati osservati precipitazione-portata.

2 LA METODOLOGIA PROPOSTA: LA FUNZIONE D'AMPIEZZA E IL MODELLO WFIUH

Il modello WFIUH è stato applicato su 4 bacini italiani, successivamente descritti, utilizzando la procedura seguente:

a) le depressioni artificiali (*pit*) e le aree pianeggianti sono state rimosse dal DEM utilizzando il modello fisicamente basato PEM4PIT (*Grimaldi et al.*, 2007; *Nardi et al.*, 2008; *Santini et al.*, in press); le direzioni di deflusso e le aree contribuenti sono definite con la metodologia D8-LTD (*Orlandini et al.*, 2003) adottando un *dampening factor* uguale a 1; il reticolo idrografico è stato estratto con il metodo della *drop analysis* abbinato al criterio della curvatura (*Tarboton et al.*, 1991; *Tarboton & Ames*, 2001) mentre per stimare la pendenza di deflusso è stato utilizzato il criterio della massima pendenza tra le 8 possibili per ogni cella del DEM.

b) la FL è stata ricavata applicando la stessa metodologia D8-LTD nei canali, mentre per i versanti si è scelto di adottare il metodo D^∞ (*Tarboton*, 1997; *Bogaart & Troch*, 2006), ovvero sia un metodo di tipo *multi flow*, di modo da considerare il fenomeno della dispersione della massa idrica sui versanti.

c) per ogni DEM è stata ricavato il tempo di *lag* a partire da dati osservati (*Bocchiola et al.*, 2003): il tempo di *lag* è stato assunto pari alla differenza tra il centroide dell'idrogramma netto e il centroide dello ietogramma netto (*Chow et al.*, 1988); l'idrogramma netto è stato ottenuto con il metodo *fixed base*, mentre lo ietogramma netto è stato ottenuto con la metodologia SCS-CN utilizzando un *Curve Number* tale da garantire l'equivalenza tra il volume netto affluito sul bacino e il volume netto defluito alla sezione di chiusura (*USDA*, 1986; *Chow et al.*, 1988).

d) la FL è stata riscalata, dando luogo a diverse FT, con i seguenti campi di velocità:

d1) velocità variabile da cella a cella, secondo l'implementazione della formula di *Maidment et al* (1996):

$$v = \frac{V_{mean}}{[S^b A^c]_{mean}} S^b A^c \quad (1)$$

dove v = velocità della cella (la formula non distingue tra velocità di canale e di versante), V_{mean} = velocità media in tutto il bacino, S = pendenza della singola cella, A = area contribuyente della singola cella, b, c = opportuni coefficienti. Al denominatore si trova il valor medio del prodotto delle mappe $S^b * A^c$. Tale formula presenta il vantaggio di avere un sol parametro (V_{mean}) in quanto gli autori suggeriscono l'uso di $b = c = 0,5$. V_{mean} è stato in questa sede ricavato tramite una procedura iterativa imponendo che il centroide della FT sia uguale al tempo di *lag* precedentemente stimato.

Velocità minime e massime rispettivamente pari a 0,01 m/s e 3 m/s sono state assunte come valori soglia inferiore e superiore in modo da evitare di

considerare velocità irrealistiche dovute a sfavorevoli combinazioni dei valori di pendenza o area contribuyente;

d2) velocità costante nei canali (pari a 2 m/s) e nei versanti (0,05 m/s);

d3) velocità costante nei canali (pari a 1 m/s) e nei versanti (0,05 m/s).

Le velocità di canale e di versante dei casi 'd2' e 'd3' sono state selezionate in accordo con i valori abitualmente utilizzati in letteratura (es. Botter & Rinaldo, 2003). Si fa notare come le metodologie 'd2' e 'd3' possano considerarsi 'tradizionali', nel senso che i due parametri necessari per la determinazione della FT a partire dalla FL (cioè le velocità di canale e di versante) sono ritenuti costanti, mentre la metodologia 'd3' può considerarsi "innovativa" perché considera sia la variabilità spaziale della mappa delle velocità, sia perché il numero dei parametri è ridotto ad uno soltanto.

e) Il WFIUH è stato applicato tramite la convoluzione della FT, ottenuta riscaldando la FL secondo gli approcci 'd1', 'd2' e 'd3' precedentemente descritti, con la precipitazione netta ricavata secondo quanto riportato al punto c).

f) gli idrogrammi finali risultanti dalle elaborazioni descritte sono stati confrontati con l'idrogramma netto 'osservato', ovvero sia depurato del deflusso di base.

Per quanto riguarda i bacini utilizzati, sono stati selezionati 4 bacini italiani estratti dal DEM IGMI (2003), le cui caratteristiche principali sono riportate in Tabella 1.

3 CASI DI STUDIO E APPLICAZIONI

A titolo di esempio si mostra in Figura 1 il DEM e il reticolo idrografico estratto del bacino *Mastallone*, nonché la mappa delle velocità variabili sui canali e sui versanti secondo l'equazione (1), corrispondente all'applicazione della metodologia 'd1' precedentemente descritta. Le mappe delle velocità corrispondenti alle applicazioni di tipo 'd2' e 'd3' non vengono mostrate perché costanti sul canale e sul versante. Come appare evidente la metodologia 'd1' è in grado di restituire un campo di velocità crescente dai primi punti del versante fino al reticolo idrografico, e quindi si distingue per la sua maggiore aderenza alla realtà.

In Figura 2, sempre per il bacino *Mastallone*, si mostrano le tre FT ottenute applicando i campi di velocità 'd1', 'd2' e 'd3', mentre in Figura 3 si mostra per lo stesso bacino il risultato dell'applicazione del modello WFIUH ottenuto tramite convoluzione delle rispettive FT con lo ietogramma netto. Nella stessa Figura compare anche l'idrogramma netto 'osservato', cioè depurato dal deflusso di base.

Dall'osservazione di Figura 2 si vede come le FT possono essere sensibilmente diverse a seconda dei parametri impiegati, e questa circostanza tende a favorire la metodologia 'd1', la quale non solo ha il vantaggio di avere soltanto un parametro da stimare, ma offre anche la caratteristica che tale parametro può essere stimato tramite un'unica informazione a scala di bacino (come il tempo di *lag* o il tempo di corruzione). Tale circostanza non si verifica invece per le metodologie 'd2' e 'd3' dove i parametri da stimare sono due.

Nelle Figure da 4 a 6 si mostrano, per brevità, per gli altri 3 bacini presi in esame soltanto le onde di piena simulate secondo le metodologie 'd1', 'd2' e 'd3'. Nelle stesse Figure compaiono anche le precipitazioni nette e gli idrogrammi netti 'osservati', cioè depurati rispettivamente dalle perdite e dal deflusso di base. Infine, in Tabella 2, sono riportate, per ogni caso di studio, le portate massime simulate congiuntamente a quella

netta 'osservata'.

Bacino	Outlet	Cellsize(m)	Area (Km ²)	Tempo di lag osservato (ore)
Mastallone	Ponte Folle	20	149	2.81
Ayasse	Champorcher	20	42	3.60
Isorno	Pontetto	20	71	3.30
Chisone	Soucheres	20	86	3.12

Tabella 1. Caratteristiche principali dei bacini presi in esame.

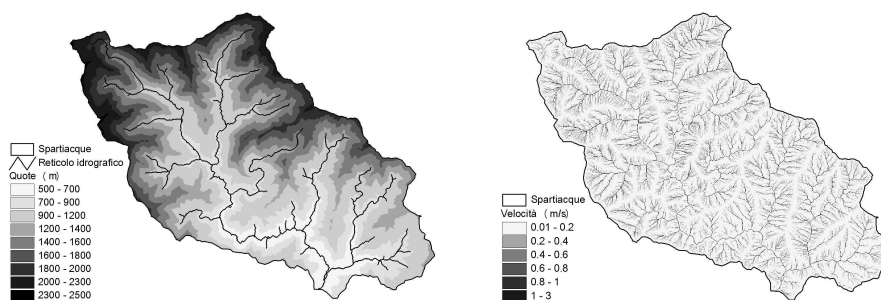


Figura 1. Bacino idrografico *Mastallone*: DEM e reticolo idrografico a sinistra, mappa delle velocità secondo *Maidment et al.* (1996) a destra.

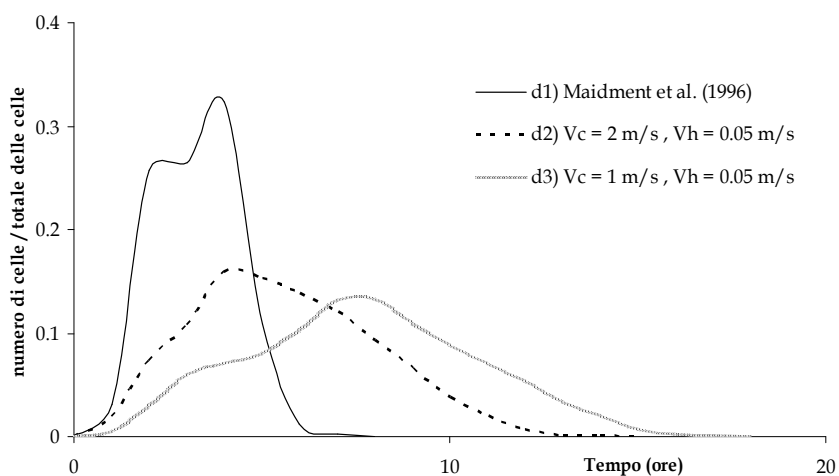


Figura 2. Bacino idrografico *Mastallone*: FT nei casi 'd1', 'd2', 'd3'. Smoothing window = 1 ora

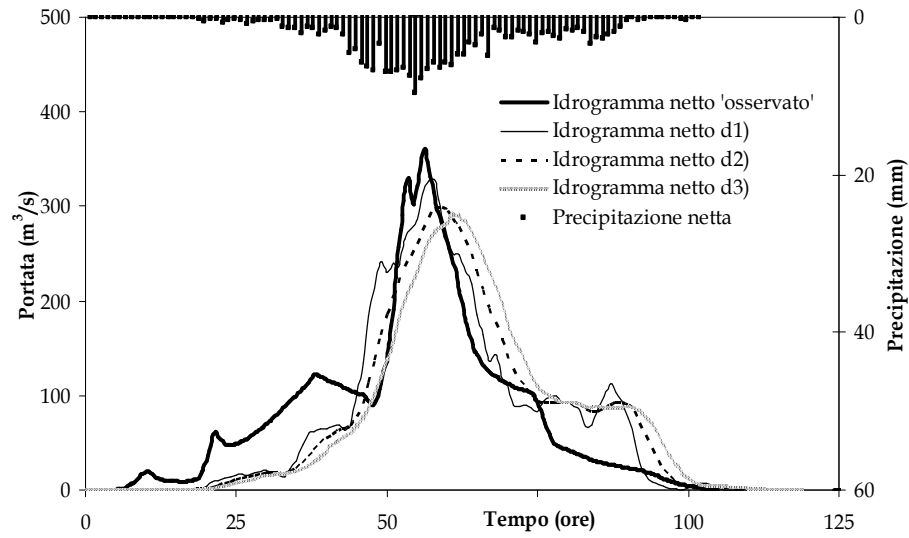


Figura 3. Bacino Mastallone: onde di piena 'osservata' e simulate nei casi 'd1', 'd2', 'd3'.

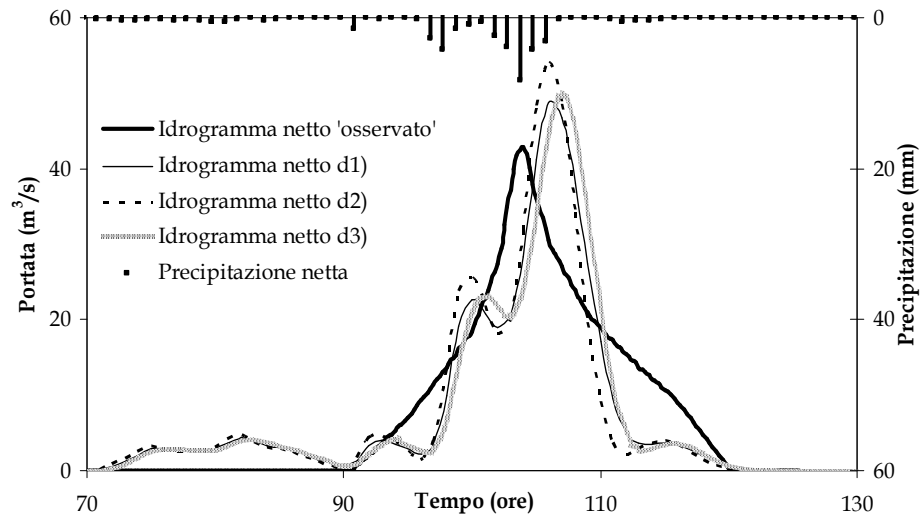


Figura 4. Bacino Ayasse: onde di piena 'osservata' e simulate nei casi 'd1', 'd2', 'd3'.

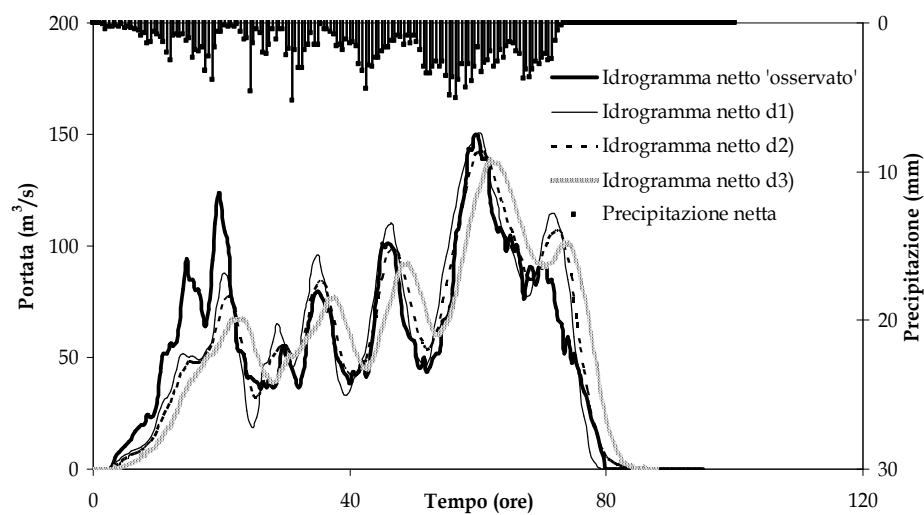


Figura 5. Bacino Isorno: onde di piena 'osservata' e simulate nei casi 'd1', 'd2', 'd3'.

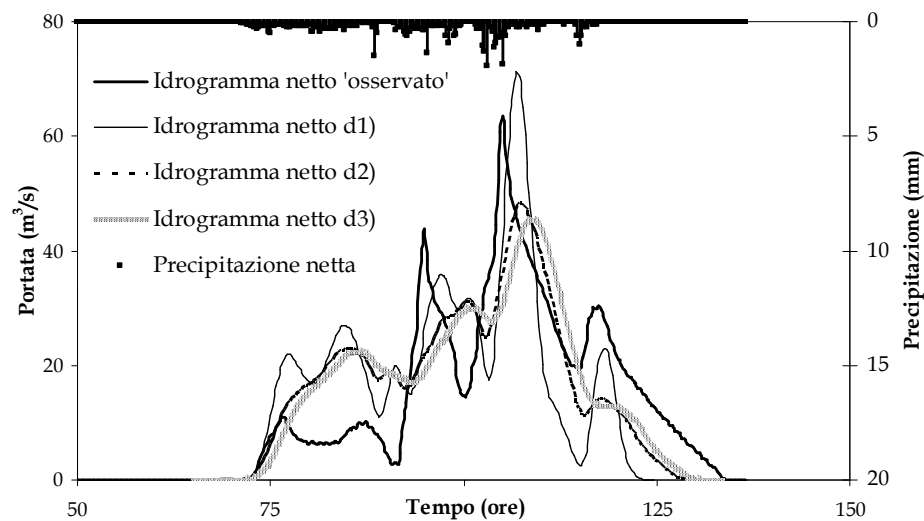


Figura 6. Bacino Chisone: onde di piena 'osservata' e simulate nei casi 'd1', 'd2', 'd3'.

Bacino	Qmax (m ³ /s)			
	'd1'	'd2'	'd3'	osservata
Mastallone	327.52	298.63	290.19	360.61
Ayasse	48.75	54.08	49.86	42.84
Isorno	150.80	142.64	138.12	149.29
Chisone	71.39	48.23	45.46	63.44

Tabella 2. Portate di picco simulate e 'osservata'.

4 CONCLUSIONI

In questo lavoro viene presentata un'applicazione di un modello afflusso-deflussi di tipo geomorfologico finalizzato alla definizione delle onde di piena di progetto in bacini non strumentati. Precisamente si considera il modello basato sulla funzione di ampiezza (WFIUH) e si introduce una procedura semplificata per definire il campo delle velocità di deflusso superficiale per risalire la WF ed ottenere così la distribuzione dei tempi di arrivo all'outlet. Tale procedura presenta un duplice vantaggio: sia fornire una rappresentazione più realistica della componente cinematica sul bacino idrografico sia ridurre ad un sol parametro le incognite del modello. I 4 casi di studio mostrati sono incoraggianti perché mostrano che la procedura semplificata produce risultati soddisfacenti e soprattutto perché si evidenzia come tale modello possa essere tarato conoscendo solamente il tempo di risposta o il tempo di corrivazione del bacino analizzato.

Ringraziamenti. Gli autori ringraziano Daniele Bocchiola, del Politecnico di Milano, per aver gentilmente messo a disposizione i dati registrati di precipitazione e portata su cui questo lavoro è basato.

BIBLIOGRAFIA

- Bates, P.D., Marks K.J., Horritt M.S. Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models, *Hydrol Process*, 17, pp. 537–557, 2003.
- Bocchiola D., De Michele C., Pecora S., Rosso R. On the response time of Italian watersheds, *L'ACQUA*, 1, 45-55, In Italian with abstract in English. 2003.
- Bogaart P. W., Troch P. A. Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response, *Hydrology and Earth System Sciences* (10) 6, 925-936. 2006.
- Botter, G., Rinaldo, A. Scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion. *Water Resour. Res.*, 39, 10, 1286. 2003.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. Applied Hydrology, McGraw-Hill International Editions. 1988.
- Cobby, D.M., Mason, D.C. Horritt M.S. and Bates P.D.. Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry, *Hydrol Process*, 17, pp. 1979–2000, 2003.
- Dunne, T. Field studies of hillslope flow processes. In: M.J. Kirkby (Editor), Hillslope Hydrology, Wiley, New York, pp 227-293. 1978.
- FLO-2D, <http://www.flo-2d.com/>.

- Grimaldi S., Nardi F., Di Benedetto F., Istanbuloglu E., Bras R.L. A physically-based method for removing pits in digital elevation models. *Advances in Water Resources*, 30(10) October 2007: 2151-2158
- Gyasi-Agyei et al., 1996. A dynamic hillslope response model in a geomorphology based rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 178, 1, pp 1-18.
- Gupta, V.K., Waymire E. and Wang, C.T. Representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resour. Res.*, 16(5): 855-862. 1980.
- Leopold, L.B., T. Maddock, Jr.. The hydraulic geometry of stream channels and some geomorphologic implications. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 252, 56. 1953
- LIDAR/ALSM Research, <http://lidar.asu.edu/>.
- Liu Y.B., Gebremeskel S., De Smedt F., Hoffmann L., Pfister L. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modelling. *Journal of Hydrology* 283, pp 91–106. 2003
- Maidment, D.R., Olivera, F., Calver, A., Eatherall, A. Unit Hydrograph derived from a spatially distributed velocity field, *Hydrological Processes*, 10, pp 831-844. 1996.
- Mesa, O. J. & Mifflin, E. R., On the relative role of hillslope and network geometry in hydrologic response. In: *Scale Problems in Hydrology* (ed. V. K. Gupta, I. Rodriguez & E. F. Wood), 1-17. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, The Netherlands. 1986.
- MIKE21, <http://www.dhigroup.com/>.
- Naden, P. Spatial variability in flood estimation for large catchments: The exploitation of channel network structure, *Hydrol. Sci. J.*, 37, 1, pp. 53–71. 1992.
- Nardi, F., Grimaldi, S., Santini, M., Petroselli, A., Ubertini, L. Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using DEMs: the flat area issue, *Hydrological Science Journal*, 53(6) December 2008, pp. 1176-1193.
- Noto, L.V., La Loggia, G.. Derivation of a Distributed Unit Hydrograph Integrating GIS and Remote Sensing. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 639-650. 2007
- OpenTopography Portal, <http://www.opentopography.org/>.
- Orlandini S., Moretti G., Franchini M., Aldigheri B. and Testa B. Path-based methods for the determination of non-dispersive drainage directions in grid-based digital elevation models, *Water Resources Research* 39(6), 2003.
- Rodriguez-Iturbe I., Valdes J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resour. Res.* 15, pp 1409-1420. 1979.
- Rodriguez-Iturbe I., Gonzalez-Sanabria M., Bras. R. A geomorphoclimatic theory on the Instantaneous Unit Hydrograph, *Water Resour. Res.* 18(4), pp 877-886. 1982.
- Sanders, B. Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling, *Advances in Water Resources*, 30, 8, pp 1831-1843. 2007.
- Santini M., Grimaldi S., Nardi F., Petroselli A., Rulli M.C. (in press), Pre-Processing algorithms and landslide modelling on remotely sensed DEMs, *Geomorphology*.
- Sherman, L.K. Streamflow from rainfall by the unit-hydrograph method, *Eng. News Rec.*, vol. 108, pp. 501-505. 1932.
- SRH-2D, <http://www.usbr.gov/pmts/sediment/model/srh2d/index.html>.
- Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe. On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrol. Processes*, 5(1), 81- 100. 1991
- Tarboton D.G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 33, 309- 319. (1997).
- Tarboton D.G., and Ames D.P. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data, in *World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida, May 20-24, ASCE. 2001.
- USDA-SCS, Urban hydrology for small watersheds. Technical release 55. Washington, DC. 1986
- WAGDA, Washington State Geospatial Data Archive, <http://wagda.lib.washington.edu/>.