

INTEGRAZIONE DI METODOLOGIE DIRETTE ED INDIRETTE PER LA STIMA DEGLI IDROGRAMMI DI PIENA IN ALVEI NATURALI

G. Corato¹, T. Moramarco¹ & T. Tucciarelli²

- (1) Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, CNR, Perugia, Italia, e-mail: g.corato@irpi.cnr.it
- (2) Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Università di Palermo, Italia, e-mail: tucciar@idra.unipa.it

SOMMARIO

Le metodologie attualmente disponibili per la misura di pieno campo delle portate possono essere classificate in base al tipo di sensore utilizzato nella stazione idrometrica ed alla possibile presenza di una seconda stazione posta sufficientemente a valle da potere stimare il tempo di trasferimento dell'onda misurata. Chiamiamo dirette le misure basate sul rilievo delle velocità e dei tiranti ed indirette quelle basate sulla sola misura dei tiranti. Per ognuna delle due tipologie vengono presentate le tecniche di analisi più recenti e delineati possibili sviluppi futuri. Viene quindi introdotta una nuova metodologia, basata sull'integrazione di misure dirette ed indirette. Nell'approccio proposto la portata viene calcolata come valore al contorno di monte di un modello di propagazione 1D a cui vengono assegnati i tiranti di monte quale condizione misurata. Il modello viene calibrato attraverso sporadiche misure istantanee di velocità, consentendo di pervenire ad una registrazione continua delle portate mediante l'ausilio delle sole osservazioni dei tiranti in una sola stazione di misura. L'approccio è validato attraverso serie storiche di tiranti e di portate misurate in una stazione idrometrica del fiume Tevere.

1 INTRODUZIONE

La misura diretta della portata in alvei naturali è usualmente effettuata integrando nello spazio i valori di velocità misurati nella sezione idrica mediante sonde meccaniche o elettromagnetiche. Questi strumenti posti a contatto diretto con la corrente, sono esposti a danneggiamenti e devono usualmente essere utilizzati da personale presente in loco. Ciò ne limita l'utilizzabilità in particolare durante eventi di piena significativi quando, tra l'altro, è praticamente impossibile il campionamento dei punti velocità nella porzione inferiore dell'area liquida usando sonde meccaniche, come il mulinello. Questo implica la mancanza di misure di flusso per tiranti idrici elevati che sono invece indispensabili per la definizione di un'affidabile scala dei deflussi. Tale problematica è stata indirizzata nella letteratura scientifica attraverso l'analisi della relazione tra velocità media, u_m , e velocità massima, u_{max} , la quale è osservata generalmente nella parte superiore dell'area liquida, dove le misure di velocità possono essere eseguite facilmente in qualsiasi condizione di flusso senza compromettere la sicurezza degli operatori. Il modello di entropia sviluppato da Chiu (1987, 1988) consente di correlare u_m e u_{max} mediante una relazione lineare (Chiu, 1991) che dipende dal parametro entropico, M , carat-

teristico della sezione fluviale. L'accuratezza della relazione lineare entropica è stata verificata per alcuni siti idrometrici di fiumi italiani (Moramarco *et al.*, 2008), ma in alcuni casi l'errore di stima sulla velocità media è risultato superiore al 25%. Per ottenere stime più accurate, Moramarco *et al.* (2004), semplificando la distribuzione entropica bidimensionale di velocità proposta da Chiu (1988), hanno sviluppato un modello per ricostruire il solido di velocità della corrente a partire dalla sola velocità massima campionata su più verticali e supponendone una distribuzione ellittica o parabolica lungo la direzione trasversale alla corrente.

La ricostruzione di un'accurata scala dei deflussi non dipende solo dalla disponibilità di numerose misure di velocità, ma anche dal fatto che queste siano effettuate durante eventi di piena significativi. Viste le difficoltà di misura anzi menzionate, per un sito idrometrico si possono allora individuare almeno quattro differenti configurazioni di monitoraggio. La prima è quella in cui nella stazione di misura vengano misurati solo i livelli a causa, ad esempio, della precaria accessibilità del sito stesso. Nella seconda configurazione, oltre ai livelli, nel sito idrometrico vengono effettuate misure di velocità, ma limitate a livelli idrici non elevati. Nella terza, la sezione fluviale è monitorata solo in termini di livello ma a monte e/o valle vi è un sito idrometrico con un'accurata scala di deflusso. La quarta configurazione è quella in cui nel sito sono monitorati solo i livelli e a valle o monte vi è un ulteriore idrometro con la misura dei soli livelli. Per ciascuna delle quattro configurazioni, possono essere applicate differenti procedure di stima della scala dei deflussi.

Per la prima configurazione, la portata può essere stimata indirettamente mediante la formulazione di Jones (Henderson, 1966), modificata successivamente da Fenton (1999) che ha introdotto, oltre alla celerità, il parametro della diffusione. Un approccio che tiene conto anche dei termini inerziali è stato proposto da Marchi (1976) che trasforma le derivate spaziali del livello idrico in derivate temporali (Moramarco & Singh, 2000). Un confronto tra questi metodi può essere trovato in Barbetta *et al.* (2002a) e più recentemente in Perumal & Moramarco (2005).

Nella seconda configurazione, si pone il problema della estrapolazione della scala dei deflussi oltre il campo delle misure di velocità disponibili. A tale proposito, possono essere utilizzati diversi approcci tra cui quello del metodo "pendenza-attrito" (Hershy, 1985) che estrapola la portata nell'ipotesi che per tiranti elevati il rapporto tra la portata misurata e la "convettanza", $AR^{2/3}$ (A , area di flusso; R , raggio idraulico) associabile alla misura osservata, tenda ad un valore costante. Tuttavia, l'approccio è risultato sufficientemente accurato laddove gli effetti non stazionari sono poco significativi; nel caso contrario l'analisi può essere migliorata mediante l'ausilio della modellistica idraulica (Barbetta *et al.*, 2002b).

Nella configurazione di monitoraggio relativa al terzo caso, diversi Autori (Birkhead & James, 1998, Franchini e Ravagnani, 2007, Moramarco *et al.*, 2005) hanno proposto versioni più o meno semplificate di modelli che stimano l'idrogramma incognito delle portate di valle mediante le altezze idriche misurate in entrambe le sezioni e l'idrogramma noto delle portate di monte. L'affidabilità degli approcci dipende dalla loro capacità di stimare gli afflussi laterali.

Nella quarta configurazione, nell'ipotesi di afflussi laterali trascurabili, la stima degli idrogrammi di portata può avvenire mediante approcci semplificati di routing dei livelli come quelli proposti da Perumal *et al.* (2007, 2010) e basate sul metodo Muskingum a parametri variabili o modelli idraulici più o meno complessi come quelli proposti

da *Aricò et al.* (2008) e *Dottori et al.* (2009). In tale ambito, il modello proposto da *Aricò et al.* (2007, 2009) ben si presta ad una tale analisi in quanto mette in relazione diretta l'idrogramma di monte delle altezze idriche con gli idrogrammi delle portate di monte e di valle, usando per la calibrazione del coefficiente di scabrezza le altezze idriche misurate nella sezione di valle. Dall'analisi di eventi di piena e test di laboratorio (*Aricò et al.*, 2010) si è visto come l'errore degli idrogrammi calcolati dipende dall'errore nella calibrazione della scabrezza e questo a sua volta è notevolmente influenzato dalla sussistenza delle ipotesi a base del modello.

Quest'ultima configurazione di monitoraggio idrometrico è quella che frequentemente è presente lungo i nostri corsi d'acqua naturali ed è quindi di interesse per la pratica idrologica. In tale contesto, questo lavoro intende valutare la fattibilità di integrazione tra il modello idraulico proposto da *Aricò et al.* (2008) per il trasferimento dei livelli, e quello entropico per la stima della velocità media della corrente. L'obiettivo è quello di aggiornare il parametro di scabrezza del canale sulla base di una semplice misura diretta di portata. Eventi di piena occorsi lungo l'asta del Fiume Tevere sono utilizzati per la validazione della metodologia.

2 METODI DIRETTI

2.1 Stima delle portate attraverso misure dirette di velocità

Al fine di indirizzare il monitoraggio della velocità durante eventi di piena salienti, *Moramarco et al.* (2004) hanno sviluppato un modello che consente di ricostruire il solido di velocità della corrente a partire dalla sola velocità massima campionata e dall'area della sezione corrispondente al livello idrometrico osservato. L'approccio utilizza una distribuzione del profilo di velocità basato sul principio dell'entropia (*Chiu*, 1987) ed una distribuzione della velocità massima lungo le verticali campionate nell'area liquida di tipo parabolico e/o ellittico (*Moramarco e Singh*, 2008):

$$u_i = \frac{u_{maxi}}{M} \ln \left(1 + (e^M - 1) \frac{y}{D_i - h_i} \exp \left(1 - \frac{y}{D_i - h_i} \right) \right) \quad i=1, \dots, N_v, \quad (1)$$

dove u_i e D_i rappresentano rispettivamente la componente della velocità normale alla sezione ed il tirante lungo l' i -esima verticale; y è la distanza verticale misurata dal fondo cui riferire la velocità u_i e h_i è la profondità dove si verifica la massima velocità campionata, u_{maxi} ; N_v è il numero delle verticali campionate nella sezione liquida; M rappresenta il parametro entropico della sezione idrometrica, stimato dalla relazione lineare tra la velocità media e massima campionata (*Moramarco e Saltalippi*, 2002). Per applicare la (1), è necessario conoscere anche la u_{maxi} , che lungo la sezione si ipotizza avere un andamento di tipo parabolico, dato dalla relazione:

$$u_{maxi}(x) = \alpha \cdot x^2 + \beta \cdot x + \gamma \quad (2)$$

dove α , β e γ sono parametri e x è la coordinata nella direzione trasversale al moto. I parametri della curva parabolica possono essere ottenuti attraverso tre semplici condizioni (*Moramarco et al.*, 2004) e dipendono solo da u_{max} . Accoppiando la (2) e la (1) ed assumendo h_i costante e misurato in corrispondenza della massima velocità campionata (*Burnelli et al.*, 2006), si ha la possibilità di ricostruire il solido di velocità dal solo

campionamento della velocità massima. Nel caso di sezioni larghe, l'eq. (2) può essere sostituita da una distribuzione di tipo ellittico (Moramarco et al., 2010). A titolo di esempio, la fig. 1 mostra l'applicazione del metodo per la misura di portata effettuata nella sezione idrometrica di Monte Molino sul Fiume Tevere, durante la prima fase di recessione del colmo di piena. Misurando la massima velocità campionata è stato ricostruito l'andamento della u_{maxi} con la (2) e quindi mediante la (1) sono stati individuati i profili di velocità nella sezione, alcuni dei quali sono riportati in fig.1. Il valore di M è stato determinato sulla base del campione di misure di velocità esistenti nel sito ed è risultato pari a 2.2. Dall'integrazione delle (1) e (2), il valore di portata stimato è risultato pari a 1030 m³/s.

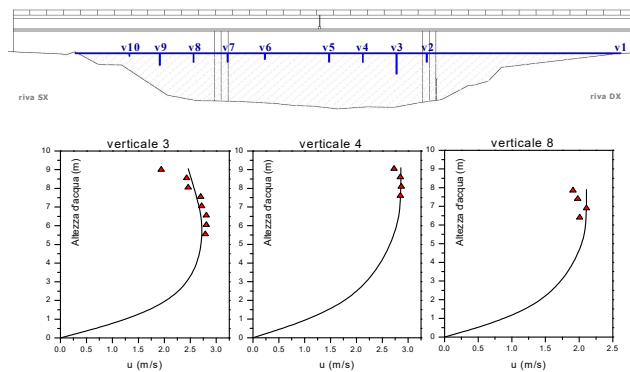


Figura 1. Misure correntometriche alla sezione di Monte Molino sul fiume Tevere durante l'evento di piena del novembre 2005.

2.2 Sviluppi futuri

Il modello entropico ben si integra nell'ambito dei recenti sviluppi tecnologici che indirizzano la misura della velocità superficiale mediante un campionamento di tipo “non contact”, utilizzando una sensoristica portatile basata su microonde e denominata “radar gun” (Costa et al., 2006). Da un punto di vista di praticità della misura correntometrica, questa apparecchiatura è fondamentale in quanto consentirebbe sia un monitoraggio della velocità non condizionato dalla magnitudo della piena che un campionamento “rapido” tale che, per la stessa piena, possono essere monitorati più siti idrometrici; operazione impensabile con l'utilizzo di tecniche tradizionali. Poiché la velocità massima superficiale è ben correlata alla velocità massima del flusso (Brocca et al., 2010), la misura effettuata dalla strumentazione radar, portatile o fissa, di tipo “non contact”, può essere allora acquisita direttamente dal modello di distribuzione entropica della velocità, come proposto da Moramarco et al. (2004), ottenendo così in tempo reale il valore della velocità media del flusso e quindi della portata.

3 METODI INDIRECTI

3.1 Stima delle portate mediante analisi di misure sincrone di livelli in condizioni di moto vario

L'idea su cui si basano i metodi indiretti (Aricò et al., 2009, Perumal et al., 2007) è quella di stimare la scabrezza media di un tratto di alveo attraverso la calibrazione di un modello numerico, utilizzando solo misure sincrone di livello ottenute nelle due sezioni estreme del tratto stesso.

Il modello numerico è costituito dalle equazioni delle acque basse, che nell'ipotesi monodimensionale si possono scrivere come (Saint Venant, 1871):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (4)$$

dove A è l'area della sezione, q la portata, h il tirante, S_0 la pendenza del fondo alveo, x è la direzione del flusso ed S_f è la pendenza motrice. Quest'ultima, attraverso la relazione di Chezy, può essere esplicitata come:

$$S_f = \frac{q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (5)$$

dove R è il raggio idraulico ed n il coefficiente di Manning. Le condizioni al contorno da applicare al modello, necessarie per ottenere una soluzione unica del problema, dipendono dal numero di Froude, Fr , che si ha alle due sezioni estreme del dominio computazionale. La tab. 1 riporta alcune possibili condizioni al contorno.

	$Fr > 1$	$Fr < 1$
Sezione di monte	$h = h_m^*$ e $(dh/dx = 0$ o $q = q_m^*)$	$h = h_m^*$
Sezione di valle	Nessuna	$h = h_v^*$ o <i>diffusione nulla</i>

Tabella 1. Possibili condizioni al contorno delle eq. (3)-(5) alle sezioni di monte, pedice m , e valle, pedice v . Con l'asterisco sono indicate i valori assegnati.

Si noti che in condizioni di correnti veloci, a monte, si dovrebbe assegnare anche la portata, che tuttavia è incognita. A questa mancanza si ovvia ricorrendo ad un'approssimazione di tipo cinematico. Inoltre, alla sezione di valle, nel caso in cui si verificano condizioni di moto subcritico, sarebbe necessario assegnare il tirante e quindi, per calibrare il modello numerico, si dovrebbe disporre di una terza misura di livello in una sezione intermedia.

Un'efficiente calibrazione è però possibile utilizzando due sole sezioni strumentate, estendendo il dominio computazionale a valle della seconda sezione strumentata e applicando alla sezione di valle di tale dominio una condizione al contorno approssimata, quale quella di diffusione nulla. L'estensione del dominio computazionale deve essere tale che la condizione al contorno di valle influenzi solo debolmente la seconda sezione di misura. Tipicamente la lunghezza del dominio viene raddoppiata rispetto la distanza tra le due sezioni strumentate.

La calibrazione del coefficiente di Manning è realizzata minimizzando una funzione obiettivo data dall'errore quadratico tra il tirante osservato e quello simulato alla secon-

da sezione strumentata in un opportuno intervallo di osservazione. Quest'ultimo è scelto in modo da includere il picco di piena, che rappresenta l'elemento più significativo dell'idrogramma e quasi tutto il ramo di concentrazione. Il ramo di esaurimento in genere viene incluso solo parzialmente, visto che ha una pendenza più bassa e con essa contribuisce ad una più bassa sensitività della funzione obiettivo rispetto alla scabrezza incognita. La minimizzazione della funzione obiettivo equivale alla soluzione della seguente equazione:

$$\int_{t_1}^{t_2} (h_v(t, n) - h_v^*) \frac{\partial h_v}{\partial n} dt = 0 \quad (6)$$

dove t_1 e t_2 sono gli estremi dell'intervallo di osservazione. La sensitività del tirante di valle rispetto al coefficiente di Manning, $\frac{\partial h_v}{\partial n}$, viene stimata ad ogni iterata perturbando n con una piccola variazione ($\Delta n = 10^{-5}$).

Il metodo di cui sopra è stato applicato con buoni risultati a diversi eventi di piena verificatisi su fiumi italiani, quali l'Arno, il Tevere e il Vallo di Diana (Aricò *et al.*, 2009) e validato sperimentalmente con prove di laboratorio (Aricò *et al.*, 2010). La fig. 2 mostra gli idrogrammi relativi all'evento di giugno 1997 verificatosi sul fiume Arno. Come si può vedere dalla fig. 2, il modello calibrato sull'idrogramma dei tiranti a Rosano, seconda sezione strumentata, riesce a stimare soddisfacentemente la portata al picco alla sezione di Incisa.

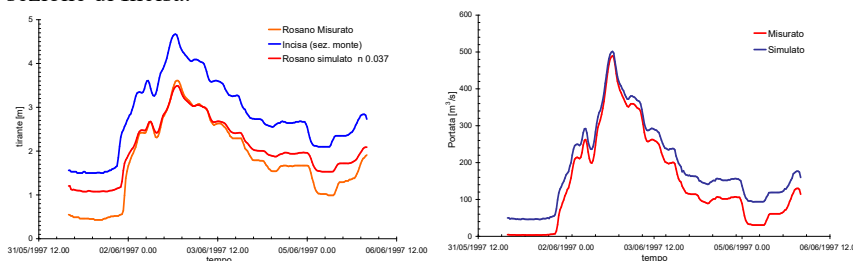


Figura 2. Confronto tra gli idrogrammi, relativi all'evento verificatosi sul fiume Arno a giugno 1997, misurati e ottenuti per calibrazione del modello numerico. Le due sezioni strumentate sono Incisa, sezione a monte, e Rosano, sezione a valle.

3.2 Sviluppi futuri

Il limite principale dei metodi indiretti sin qui sviluppati è costituito dalle semplificazioni introdotte nel modello matematico di propagazione della piena, fra cui in particolare quello di assenza di afflussi laterali incogniti fra le due sezioni misura, nonché di validità della legge di resistenza di Manning su tutto l'alveo mediante l'utilizzo di un solo coefficiente di scabrezza incognito. La natura monoparametrica del modello adottato, nonché la presenza delle semplificazioni suddette, ha reso opportuno inoltre selezionare per la calibrazione della scabrezza, fra gli eventi disponibili, quello caratterizzato da una maggiore regolarità dell'idrogramma misurato nella sezione di valle. Ciò comporta la perdita delle informazioni potenzialmente contenute nelle serie storiche dei livelli registrati in continuo, al di fuori dell'evento prescelto, nelle due sezioni di misura.

Le simulazioni condotte nella ricerca di *Aricò et al.* (2009) hanno evidenziato che l'eterogeneità della scabrezza all'interno della sezione, o comunque un aumento della resistenza con il tirante maggiore rispetto a quanto previsto dalla legge di Manning, provocano una deformazione dell'onda propagata, rispetto a quella calcolata, che possiamo ritrovare sia nel caso del caso del Fiume Tevere che in quello del Fiume Arno. Si osservi, nella fig. 3, il confronto fra i valori calcolati dal modello nell'evento di dicembre 1996 sul Fiume Tevere con due possibili valori del coefficiente di Manning e l'idrogramma sperimentale.

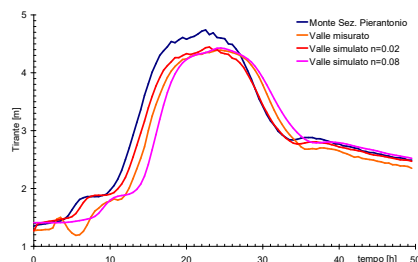


Figura 3. Confronto tra il tirante misurato durante l'evento di dicembre 1996 sul fiume Tevere (sezione Ponte Felcino) e quelli simulati con due coefficienti Manning.

Risulta evidente che la pendenza dell'idrogramma misurato è minore rispetto a quella calcolata dal modello nella fase di crescita e leggermente maggiore nella fase di esaurimento per ambedue gli programmi calcolati con scabrezza costante.

La scelta dei parametri ottimali da selezionare per il modello, nonché la stima dell'incertezza ad essi associata, può condotta seguendo le indicazioni maturate in questi ultimi anni da un gruppo di ricercatori nello specifico settore della calibrazione dei modelli idrologici (*Werner et al.* (2005), *Beven & Freez* (2001), *Aronica et al.* (2002)) ed utilizzando metodologie di calcolo ampiamente consolidate.

4 INTEGRAZIONE FRA METODI DIRETTI ED INDIRETTI PER UN MONITORAGGIO CONTINUO DELLE PORTATE

L'analisi della distribuzione di velocità all'interno del solido di portata, ovvero l'applicazione del metodo entropico, consentono di ottenere stime affidabili della portata, effettuando poche misure di velocità all'interno della sezione. Malgrado ciò, l'acquisizione in continuo delle misure di portata richiederebbe l'installazione fissa di diversi strumenti (quali ADCP o radar), piuttosto vulnerabili sia rispetto al vandalismo che (nel caso dell'ADCP) al trasporto solido operato dalle piene.

Di contro, nei metodi indiretti l'analisi di misure sincrone di livelli operate in continuo in due sezioni dell'alveo, mediante più semplici misuratori di livello, consente di ottenere un andamento continuo delle portate, anche in condizioni di piena. Inoltre, a differenza dei metodi diretti che si basano su misure di grandezze locali, i metodi indiretti si basano sull'integrazione delle equazioni di Saint Venant su un intero tratto d'alveo e quindi sono meno sensibili rispetto ad errori locali della geometria dell'alveo.

La stima indiretta, oltre a richiedere la disponibilità di dati topografici delle sezioni fluviali nella zona compresa fra le due sezioni di misura, è però più approssimata di quella precedente, specie se vengono a mancare una o più delle ipotesi a base del meto-

do descritto nella sezione 3 e fra queste sia la mancanza di significativi afflussi laterali fra le due sezioni che un limitato trasporto solido.

Un ottimo riscontro fra i valori di portata calcolati nella sezione di monte dal modello idraulico descritto nella sezione 3 e quelli forniti dalle scale di portata nei corsi d'acqua utilizzati per la validazione da *Aricò et al* (2009), si ottiene, invece, accoppiando lo stesso modello idraulico con quello entropico. In questo modo è possibile effettuare preventivamente ed in tempo reale la calibrazione della scabrezza anche su un solo valore di portata misurato istantaneamente. In particolare, utilizzando, ad esempio, un'apparecchiatura radar di tipo "non contact", può essere campionata la velocità massima superficiale da cui, con l'approccio entropico, stimare la portata istantanea che andrà ad essere utilizzata dal modello idraulico per la calibrazione del Manning. Ciò consentirebbe inoltre di utilizzare una sola stazione idrometrica ed i dati topografici di una porzione d'alveo più piccola di quella richiesta nei metodi indiretti per potere valutare il tempo di trasferimento dell'onda.

Nella fig. 3a è riportato un confronto tra gli idrogrammi relativi all'evento di dicembre '96 al sito di Pierantonio sul Fiume Tevere, misurati e ottenuti sia mediante la metodologia descritta nella sezione 3.1 che calibrando il coefficiente di Manning con una sola misura di portata durante la fase di risalita dell'evento. Dalla fig. 3a si può notare che gli idrogrammi di portata stimati in quest'ultimo modo ben riproducono quello misurato anche effettuando la calibrazione solo nella parte iniziale della piena (12 ore). Per l'evento in questione, come mostrato nella stessa fig. 3b, il modello idraulico così calibrato riesce a propagare l'onda di piena fino alla sezione di Ponte Felcino, dove l'idrogramma misurato è sufficientemente ben riprodotto da quelli simulati. Si nota come il modello migliori notevolmente le sue performance rispetto alla semplice calibrazione del Manning basata solo sui tiranti osservati.

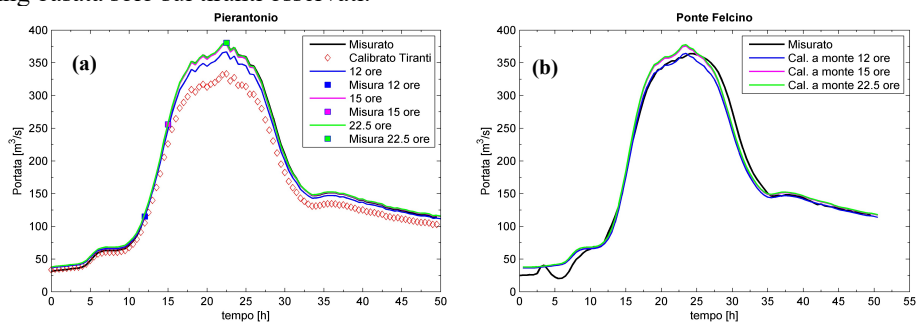


Figura 3. Evento di dicembre '96, ai siti di Pierantonio (sezione di monte) e Ponte Felcino. (a) confronto a Pierantonio tra l'idrogramma misurato e quelli ottenuti per calibrazione su una misura di portata nonché sui tiranti a valle; (b) confronto a Ponte Felcino tra l'idrogramma misurato e quelli propagati dal modello idraulico.

Nella fig. 4a è riportato il confronto degli idrogrammi di portata, relativo a 3 eventi verificatisi sempre in località Pierantonio in febbraio 1999, dicembre 2000 e novembre 2005 utilizzando come parametro di Manning quello ottenuto mediante calibrazione dell'evento di dicembre 1996. Dalla figura si vede come per due dei tre eventi l'errore tra l'idrogramma simulato e quello misurato è molto piccolo malgrado la distanza temporale e diviene significativo solo per l'evento di novembre 2005. Quest'ultimo evento tuttavia è quello in cui si verificano le portate massime, molto maggiori di quelle relati-

ve all'evento del dicembre 1996; inoltre l'evento si è verificato a grande distanza temporale dalla misura della portata di calibrazione e ciò potrebbe comportare una variazione della morfologia e quindi della scabrezza media dell'alveo. Dalla fig. 4b si può invece notare come una semplice misura istantanea della portata può migliorare notevolmente le capacità del modello idraulico nel riprodurre l'idrogramma di portata anche per l'evento di novembre 2005.

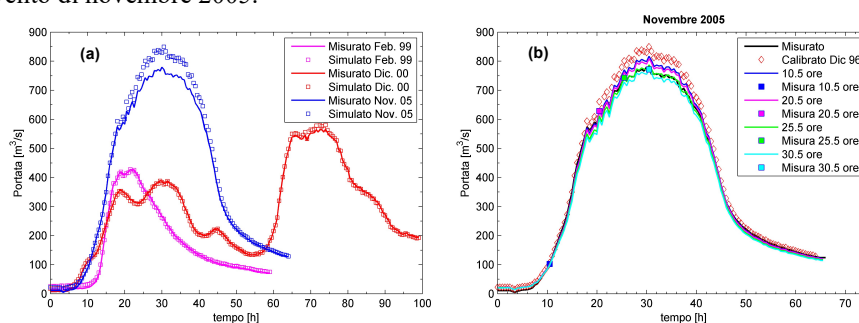


Figura 4. Confronto tra gli idrogrammi di 3 eventi nella sezione di Piernationio, sul fiume Tevere: (a) confronto tra quelli misurati e quelli simulati con $n = 0.043$ ottenuto calibrando sulla misura di portata a 15 ore dell'evento di dicembre 1996; (b) confronto tra l'idrogramma misurato e quelli ottenuti per calibrazione considerando una sola misura istantanea di portata per l'evento novembre 2005.

5 CONCLUSIONI E RINGRAZIAMENTI

Nel presente lavoro vengono introdotte le metodologie più recenti per la stima della portata in alveo, classificandole come dirette (inclusive di misure di velocità) ed indirette. Una prima combinazione delle due tipologie si è dimostrata molto promettente per la realizzazione di un monitoraggio continuo delle portate, basato solo su misure continue di livelli e sporadiche misure istantanee di portata acquisibili con apparecchiature radar “non contact”. La ricerca è finanziata con i fondi PRIN 2008 del progetto “Integrazione di misure idrometriche in alveo per il monitoraggio delle portate e dei parametri di resistenza idraulica di un corso d'acqua”.

BIBLIOGRAFIA

- Aricò, C., Nasello, C. & Tucciarelli, T., Peak flow estimation by means of synchronous water level measurements, *Proc. of EGU General Assembly*. Wien, Austria, 15-20 April 2007.
- Aricò, C., Nasello, C. and Tucciarelli, T., Using unsteady water level data to estimate channel roughness and discharge hydrograph, *Adv Water Resour*, 2009; 32(8):1223-1240. doi:10.1016/j.advwatres.2009.05.001.
- Aricò, C., Corato, G., Meftah, M. B., Mossa, M., Petrillo, A.F., & Tucciarelli, T. Validation of indirect discharge estimation in open channels by means of lab experiments, *Proc. of the First European IAHR Conference*, Edinburgo, 4-6 Maggio 2010.
- Aronica, G., Bates, P. & Horritt, M., Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. *Hydrological Processes*, 2002; 16: 2001-2016.
- Barbetta, S., Melone, F., Moramarco, T. & Saltalippi, C., On discharge simulation from observed

- stage hydrographs, *Proc. IASTED International Conference*, Crete Greece, 25-28 June 2002a.
- Barbetta S., Melone F., Moramarco T., Sull'accuratezza dei metodi di stima delle scale di deflusso, *Atti 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Potenza 16-19 Settembre 2002b.
- Beven, K., Freer, J., Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the glue methodology. *Journal of Hydrology*, 2001, 249 (1-4), pp. 11-29.
- Birkhead, A. L. & James, C. S., Synthesis of rating curves from local stage and remote discharge monitoring using nonlinear Muskingum routing, *J. Hydrol.*, 1998; 205: 52-65.
- Brocca, L., Corato, G., Corradini, C., Melone, F. & Moramarco, T. Stima della velocità media in canali naturali attraverso il monitoraggio della velocità massima superficiale, *Atti 32° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Palermo, Italia, 2010
- Burnelli A., Melone F., & Moramarco T., Misura di velocità e scale di deflusso su base entropica, *Rapporto attività GNDCI Unità Operativa*, 2005, 1.47, Dicembre 2005.
- Chiu, C. L., Entropy and probability concepts in hydraulics, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 1987, 113(5): 583-600.
- Chiu, C. L., Entropy and 2-D velocity distribution in open channels, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 1988, 114(7): 738-756.
- Chiu, C. L., Application of entropy concept in open-channel flow study, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE 1991; 117(5): 615-628.
- Corato, G., Gueli, R. & Tucciarelli T. Discharge and bed roughness estimation from water level data analysis, *8th Conference on Hydroinformatics*, Concepción, Chile, 12-16 Gennaio 2009
- Costa, J. E., Cheng, R. T., Haeni, F. P., Melcher, N., Spicer, K. R., Hayes, E., Plant, W., Hayes, K., Teague, C. & Barrick, D., Use of radar to monitor stream discharge by noncontact methods, *Water Resources Research*, 2006, (42), doi: 10.1029/2005WR004430
- Dottori, F., Martina, L. V. & Todini, E., A dynamic rating curve approach to indirect discharge measurements, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2009, 13, 847-863.
- Fenton, J. D., Calculating hydrographs from stage records, *Proc. 28th IHAR Congress*, Graz, Austria, 1999.
- Franchini, M. & Ravagnani, F., Costruzione della scala di deflusso in una sezione con sole misure di livello utilizzando le portate registrate a monte ed un modello diffusivo convettivo. *L'acqua*, 2007; 5: 9-20.
- Henderson, F. M., Open canal flow, *Macmillan Series in Civil Engineering*, Macmillan Eds., 1966, New York, USA, pp. 522.
- Herschy, R.W., *Streamflow measurement (2nd edition)*, 1985, E & FN, Spon, London
- Moramarco, T., Saltalippi, C. & Singh, V.P. Estimation of mean velocity in natural channels based on Chiu's velocity distribution equation, *J. Hydrologic Engrg.* 2004; 9(1): 42-50.
- Moramarco, T., Ammari, A., Burnelli, A., Mirauda, D. & Pascale V., Entropy Theory Application for Flow Monitoring in Natural Channels. *Proc. Int. Congr on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2008)*, 2008, Barcelona, Spain, 7-10 Luglio 2008, 430-437.
- Moramarco, T., Saltalippi, C. & Singh V.P., Velocity profiles assessment in natural channel during high floods, *Hydrology Research*, 2010, in press.
- Moramarco T., Singh V.P., A practical method for analysis of river waves and for kinematic wave routing in natural channel networks, *Hydrological Processes*, 2000, 14(1), 51-62.
- Marchi, E., La propagazione di onde di piena, *Atti Accademia Nazionale dei Lincei*, 1976, 64, 594-602.
- Perumal, M., Moramarco, T., Sahoo, B. & Barbetta, S., A methodology for discharge estimation and rating curve development at ungauged river sites, *Water Resour. Res.*, 2007; 43, W02412. doi:10.1029/2005WR004609.
- Perumal, M., T. Moramarco, B. Sahoo, and S. Barbetta, On the practical applicability of the VPMS routing method for rating curve development at ungauged river sites, *Water Resour. Res.*, 2010, doi:10.1029/2009WR008103, in press.
- Werner, M.G.F., Hunter, N.M. & Bates, P.D., Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation, *Journal of Hydrology*, 2005; 314: pp. 139-157.