



## Un modello numerico del bacino idrografico del fiume Ledra

Alessandro Coccolo, Daniele Goi, Matteo Nicolini, Roberto Perin

Obiettivo del “Progetto di Ricerca L.e.d.r.a. Project” è quello di effettuare un’analisi qualitativa a scala di bacino idrografico che preveda la messa a punto di un modello numerico idrologico-idraulico di simulazione dei deflussi del fiume Ledra e dei suoi affluenti, al fine di ottenere uno strumento utilizzabile sia per la tutela e la razionalizzazione della risorsa idrica sia per l’analisi, la valutazione e la mitigazione del rischio idrogeologico. In particolare il progetto di ricerca è articolato in tre fasi:

- 1) effettuare lo studio relativo ai processi di trasformazione afflussi-deflussi a scala di bacino idrografico e di bacino idrogeologico, in modo tale da quantificare le portate generate dal fiume Ledra e dai suoi principali affluenti;
- 2) effettuare lo studio relativo ai processi di trasformazione afflussi-deflussi a scala di distretto urbano/industriale degli insediamenti antropici ubicati all’interno del bacino idrografico, in modo tale da quantificare le portate da essi generate e direttamente immesse nel fiume;
- 3) effettuare uno studio-pilota in grado di definire un approccio metodologico e progettuale per la gestione delle acque meteoriche di dilavamento generate dalle aree urbane e/o industriali modellando i fenomeni di *build-up* (accumulo) e di *wash-off* (dilavamento) delle sostanze inquinanti.

L’articolo fornisce una sintesi relativa alla prima fase del progetto di ricerca L.e.d.r.a.

**La “Consulta sperimentale di bacino del Fiume Ledra” dalla sua costituzione ha sviluppato alcuni studi relativi alle acque del fiume Ledra coinvolgendo vari enti, società e associazioni territoriali. L’articolo presenta la modellizzazione numerica idrologico-idraulica del fiume Ledra e dei suoi affluenti**

dott. ing. **Alessandro Coccolo**,  
CP Ingegneria, Gemona del Friuli (Ud)  
prof. **Daniele Goi**,  
Università degli Studi di Udine,  
Dipartimento di Chimica, Fisica e Ambiente  
prof. **Matteo Nicolini**,  
Università degli Studi di Udine,  
Dipartimento di Chimica, Fisica e Ambiente  
dott. ing. **Roberto Perin**,  
Università degli Studi di Udine,  
Dipartimento di Chimica, Fisica e Ambiente

Project e riporta una breve descrizione dell’area oggetto di studio, le metodologie scientifiche impiegate e alcune considerazioni circa gli obiettivi e gli sviluppi futuri che si intendono perseguire.

### L’area di studio

Il fiume Ledra, affluente di sinistra del fiume Tagliamento, nasce a sud di Gemona del Friuli, in località Paludo, dagli apporti provenienti da una serie di sorgenti poste a valle dei conoidi del torrente Vegliato. Proprio in prossimità di tale zona confluiscano nel fiume le portate provenienti dalla roggia di Gemona (di “Ospedaletto” o “Roggia dei Molini”), la quale ha il duplice compito di collettare sia le acque derivate dal fiume Tagliamento nei pressi di Ospedaletto, sia gli apporti di carattere prettamente torrentizio provenienti dal torrente Vegliato che, dopo aver percorso la base del monte Cjampon, giunge fino alla zona pianeggiante di Gemona del Friuli.

Procedendo verso valle il fiume Ledra viene alimentato dagli apporti idrici garantiti da altri due importanti

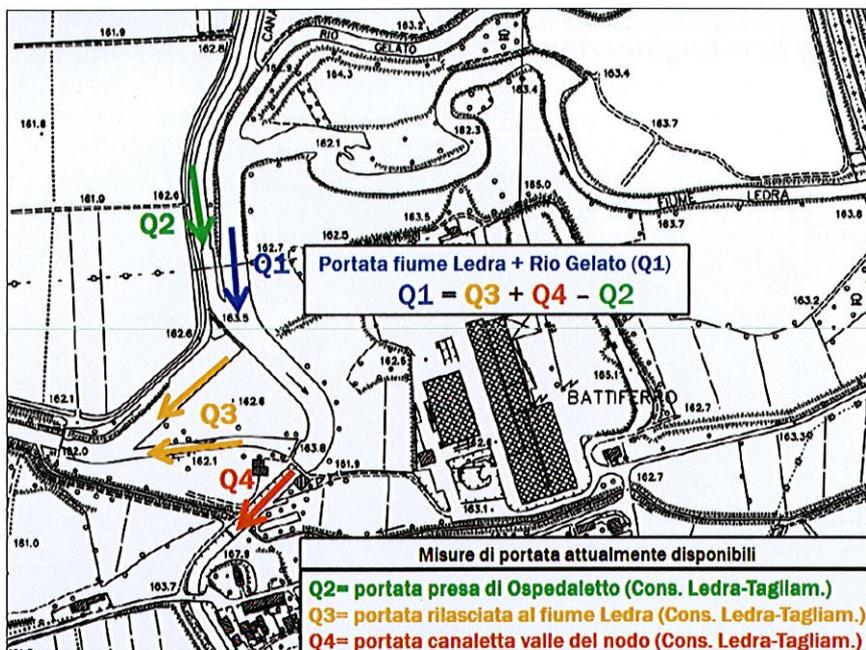


Fig. 1

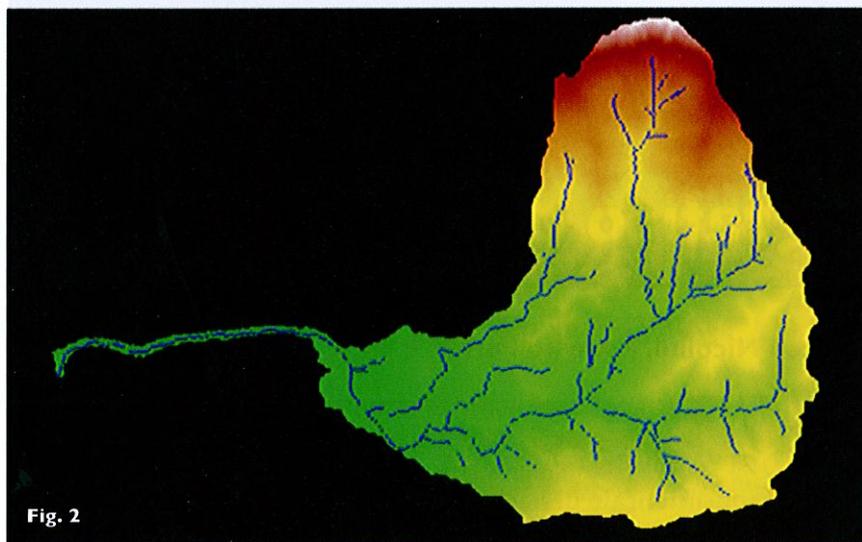


Fig. 2

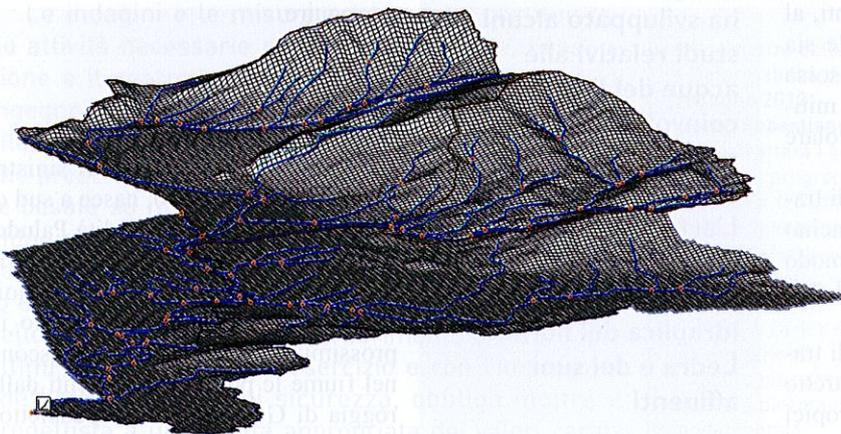


Fig. 3

Fig. 1, Nodo idraulico di Andreuzza (Buja).

Fig. 2, Sottobacino idrografico del torrente Orvenco determinato con il software TAS (Terrain Analysis System).

Fig. 3, Mesh di calcolo del bacino idrografico del fiume Ledra (sezione di chiusura Andreuzza) ottenuta con WMS (Watershed Modeling System).

Fig. 4, Sezioni di misura individuate per le misure di portata lungo l'alveo del fiume Ledra ed affluenti.

Fig. 5, Misura di portata con mulinello elicoidale (fiume Ledra).

Fig. 6, Misura di portata con profilatore di velocità a ultrasuoni ADCP (rio Gelato).

Fig. 7, Esempio di scala delle portate (in blu curva delle portate estrapolata dai valori puntuali di portata misurati).

Sopra il titolo, confluenza fiume Ledra-rio Bosso.

affluenti: il torrente Orvenco (i cui deflussi sono di carattere prettamente torrentizio) e il rio Bosso. Il maggior contributo in termini di portata risulta tuttavia essere garantito da alcune grosse polle, la più importante delle quali è quella del così detto rio Gelato (località San Floreano, Buja), che traggono origine dalle dispersioni del fiume Tagliamento.

Risulta pertanto evidente come la parte terminale del fiume Ledra sia alimentata quasi esclusivamente da numerose risorgive che rendono l'idrografia dei corsi d'acqua tributari particolarmente complessa e incerta.

Le portate del fiume Ledra osservabili alla foce non sono quelle naturali bensì delle portate "modificate" a causa della presenza del nodo idraulico di Andreuzza (fig. 2). Tale nodo è formato dall'intersezione del corso naturale del fiume Ledra con il canale artificiale d'irrigazione Ledra-Tagliamento, realizzato per sopperire ai fabbisogni irrigui dell'alta pianura friulana centrale. In esso confluiscono pertanto sia le portate del tratto superiore del canale Ledra-Tagliamento (canale sussidiario), derivate dal fiume Tagliamento nei pressi di Ospedaletto (Gemona del Friuli), sia le portate naturali del fiume Ledra e suoi affluenti. Le portate globali sono poi ripartite nel tratto di canale a valle del nodo idraulico (canale principale) e nella prosecuzione del corso naturale del fiume Ledra (per mezzo di due canali artificiali di scarico).

Relativamente alla definizione della morfologia del bacino idrografico del fiume Ledra (73 kmq) esso è caratterizzato dalla presenza di tre importanti sottobacini, ognuno dei quali rappresentativo dei maggiori tributari del fiume: il torrente Vegliato, il torrente Orvenco e il rio Bosso.

Il sottobacino del torrente Vegliato presenta una morfologia di tipo prettamente montano ma, nonostante la sua estensione (15,3 kmq), garantisce modesti apporti idrici superficiali al fiume Ledra soltanto in occasione di eventi pluviometrici particolarmente intensi. Le cause sono da ricercarsi nella struttura geologica di tale sottobacino, costituita da rilievi carbonatici molto fessurati, che assorbono in maniera pressoché completa le precipitazioni che interessano i versanti insistenti sulla conoide di Gemona del Friuli. Il ridotto ruscellamento nel sottobacino del torrente Vegliato è testimoniato infatti dall'assenza quasi perenne di acque nel suo alveo.

Il sottobacino del torrente Orvenco (12,8 kmq), anch'esso di morfologia di tipo montano, è caratterizzato sia da formazioni di tipo flyschoidi sia di tipo carbonatico, e garantisce anch'esso apporti idrici superficiali al fiume Ledra soltanto in occasione di eventi pluviometrici di una certa rilevanza.

Il sottobacino del rio Bosso (15,3 kmq), a differenza dei primi due, presenta una morfologia prevalentemente pianeggiante con la presenza di una considerevole rete di canali di bonifica a servizio delle aree a vocazione agricola. Fa eccezione la zona confinante con il sottobacino del torrente Orvenco, caratterizzata da una morfologia di tipo marcatamente collinare.

### I modelli di trasformazione afflussi-deflussi

Il meccanismo di trasformazione degli afflussi meteorici in deflussi superficiali e sotterranei rappresenta un tema di notevole interesse scientifico, a causa sia dell'estrema complessità dei processi fisici che sono coinvolti, sia per le potenzialità che la modellazione idrologica offre come strumento di previsione delle piene e di salvaguardia delle risorse idriche.

I modelli idrologici di trasformazione afflussi-deflussi forniscono pertanto una descrizione matematica del bilancio idrologico che si svolge nel bacino idrografico, attraverso cui le precipitazioni meteoriche si trasformano in deflussi nella corrispondente sezione di chiusura. Accertata l'impossibilità di rappresentare mediante rigorose leggi fisiche il comportamento del sistema bacino, i modelli matematici ne costituiscono, dunque, delle schematizzazioni più o meno semplificate.

Nell'ambito del presente "Progetto di Ricerca" si è optato per utilizzare due tipologie differenti di modelli idrologici: un modello a parametri concentrati e un modello a parametri distribuiti, al fine di confrontare i risultati forniti e cogliere le potenzialità dell'uno e dell'altro nel simulare i differenti regimi idrologici (fasi di magra, morbida e piena) del fiume Ledra.

Relativamente ai modelli di tipo concentrato il codice di calcolo utilizzato è HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*), sviluppato da HEC (*Hydrologic Engineering Center*), centro di ricerche e studi dell'USACE (*United States Army Corps of Engineers*).

Stabilito il criterio con il quale modellare i processi di infiltrazione nel terreno (in modo tale da ottenere gli afflussi netti al sistema oggetto di studio), per il calcolo della trasformazione degli afflussi (netti) in deflussi HEC-HMS si avvale sia di

reticolo fluviale. Per quanto riguarda la simulazione dei deflussi ipodermici e profondi HEC-HMS, consente di utilizzare alcuni metodi di tipo empirico che, in modo semplificato, consentono di determinare il contributo del bacino idrografico in termini di

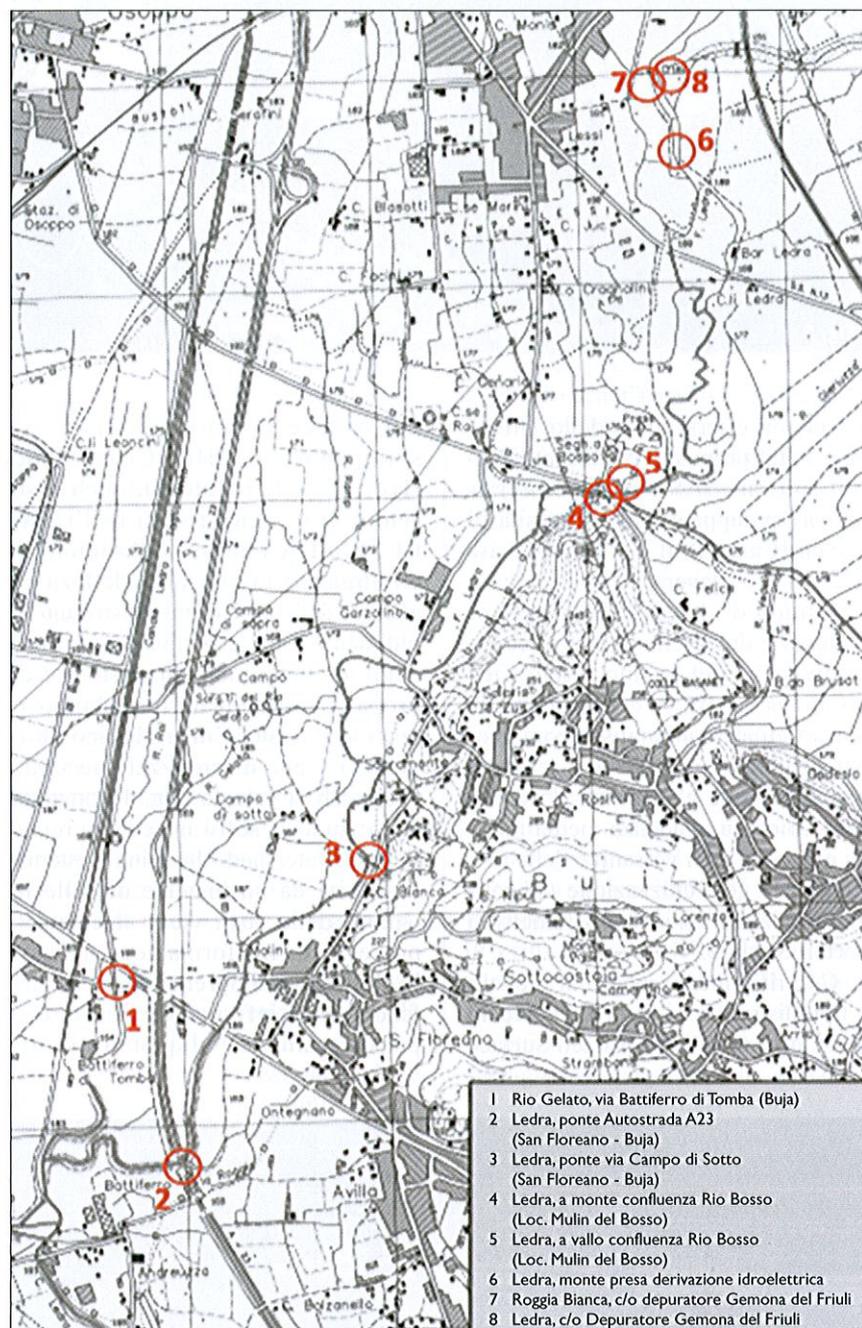


Fig. 4

metodi empirici basati sull'utilizzo di idrogrammi unitari (UH di tipo sintetico oppure definiti dall'utente), sia di metodi concettuali basati ad esempio sulla teoria dell'onda cinematica (*Kinematic Wave*). Determinati i deflussi superficiali generati dal bacino idrografico, HEC-HMS prevede anche la possibilità di simulare la propagazione con schema monodimensionale (1D) dei deflussi lungo il

portata nelle fasi successive a eventi meteorici.

Una delle principali limitazioni insite nell'utilizzo di HEC-HMS è rappresentata dalla necessità di dover effettuare sia la suddivisione del bacino idrografico in sottobacini, sia la relativa determinazione di alcuni parametri geomorfologici (fondamentali per i processi di trasformazione afflussi-deflussi) utilizzando specifici



Fig. 5

programmi esterni al modello idrologico. A tal proposito è stato utilizzato il software TAS (*Terrain Analysis System*) sviluppato dall'Università di Guelph (Canada), il quale, sulla base di un rilievo laserscan del terreno, è in grado di determinare il reticolo fluviale del bacino idrografico, la suddivisione del bacino idrografico in sottobacini (fig. 3) e, per ognuno di essi, effettuare un'analisi geomorfologica fornendo ad esempio le quote medie, minime e massime, la curva ipsografica, la pendenza media minima e massima dei versanti e delle aste fluviali, la gerarchizzazione del reticolo fluviale, i valori dei parametri di Horton-Strahler.

Con riferimento invece ai modelli di tipo distribuito, il codice di calcolo utilizzato è GSSHA (Gridded Surface

Subsurface Hydrologic Analysis) sviluppato dal CHL (Coastal and Hydraulics Laboratory), anch'esso centro di ricerche e studi dell'USA-CE. GSSHA è un modello idrologico-idraulico in cui la modellazione afflussi-deflussi è di tipo distribuito e bidimensionale, accoppiata a un modello idraulico monodimensionale di propagazione dei deflussi lungo il reticolo fluviale. L'intero bacino idrografico viene discretizzato secondo una mesh di calcolo (fig. 4), ottenuta utilizzando il software commerciale WMS (Watershed Modeling System), costituita da un insieme di celle in ognuna delle quali viene calcolato il processo di trasformazione afflussi in deflussi (comprensivo anche dei fenomeni di infiltrazione del terreno per determinare l'aliquota degli af-

flussi netti) successivamente integrato su tutta l'area del bacino idrografico in modo da fornire risultati relativi all'intero dominio di studio.

Le potenzialità del codice GSSHA vanno oltre il mero aspetto idraulico-idrologico, in quanto, sulla base di un rilievo laserscan del terreno, esso è in grado di realizzare un DEM (Digital Elevation Model) che restituisce sia i principali parametri geomorfologici del bacino idrografico, sia la sua suddivisione in sottobacini e la determinazione del reticolo fluviale sulla base delle linee di imprevio calcolate. Per quanto riguarda la simulazione degli apporti idrici provenienti dal sottosuolo GSSHA consente inoltre di modellare, seppure in modo semplificato non essendo un codice di calcolo di tipo prettamente idrogeologico, gli scambi che intercorrono tra la falda e reticolo fluviale. Ciò non appena risulti possibile reperire dati freaticometrici tali da consentire al codice di calcolo di ricostruire virtualmente una mappa tridimensionale dell'acquifero.

Nel caso del bacino idrografico del fiume Ledra, come menzionato in precedenza, gli apporti idrici provenienti dal sottosuolo risultano di notevole importanza, in quanto costituiscono una sorta di "serbatoio infinito" che garantisce un approvvigionamento, seppur modesto, anche durante periodi siccitosi particolarmente prolungati. Ne consegue pertanto che una loro corretta modellazione risulta fondamentale ai fini del presente "Progetto di Ricerca".

## Il ruolo delle misure di portata in ambito fluviale

L'obiettivo delle campagne di misura di portata è quello di pervenire a una migliore definizione del processo idrologico di trasformazione afflussi-deflussi (ovvero nelle determinazioni delle precipitazioni efficaci al netto dei processi di infiltrazione) e del processo di propagazione delle onde di piena all'interno del reticolo fluviale del fiume Ledra e dei suoi affluenti.

Le campagne di monitoraggio sono da considerarsi pertanto fondamentali per la taratura e validazione dei modelli numerici, dove, mediante la variazione sistematica dei valori di alcuni parametri (ad esempio, i coefficienti di afflusso dei sottobacini, i parametri di infiltrazione del terreno, le scabrezze delle superfici scolanti, i coefficienti di scabrezza dell'alveo,

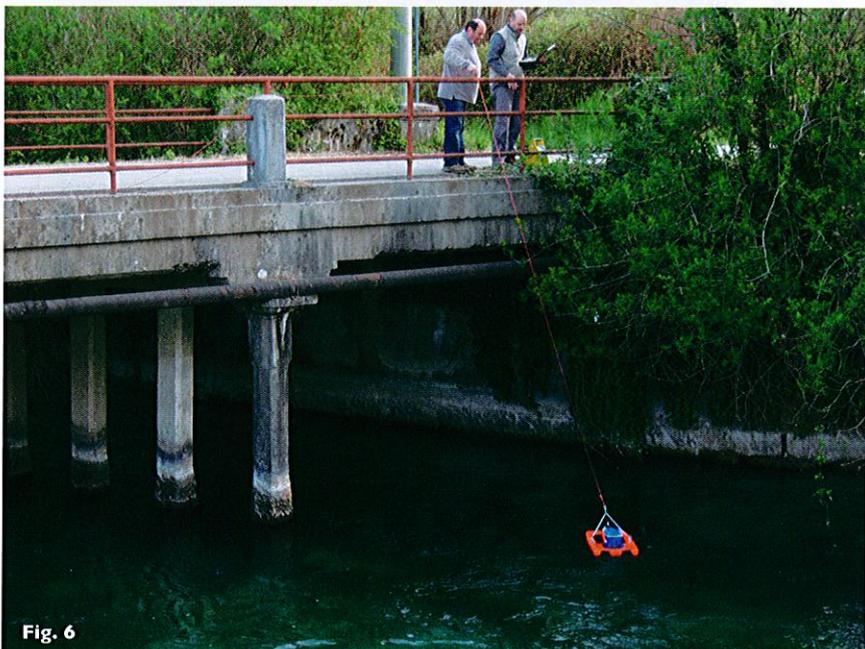


Fig. 6

ecc.), si intende minimizzare l'errore tra i dati misurati in situ e quelli forniti dai modelli numerici negli stessi punti oggetto di misura.

A oggi, relativamente al fiume Ledra sono disponibili esclusivamente le serie storiche delle portate registrate in continuo presso il nodo idraulico di Andreuzza da parte del Consorzio di bonifica Ledra-Tagliamento. Tale dato risulta essere "insufficiente" a fini modellistici in quanto è rappresentativo delle portate globali generate dall'intero bacino idrografico del fiume (comprensive anche di quelle del rio Gelato), non essendo pertanto in grado né di fornire informazione alcuna circa il singolo contributo in termini di portata fornito da ciascun tributario del fiume Ledra, né di identificare i tratti d'alveo maggiormente interessati da apporti idrici di tipo sotterraneo oppure da fenomeni di dispersione delle portate.

Nell'impossibilità di potersi attualmente avvalere di stazioni di misura in continuo delle portate lungo il corso del fiume, sono in fase di svolgimento campagne di misura delle portate di tipo puntuale effettuate in determinate sezioni del corso d'acqua (fig. 5) considerate come "idraulicamente significative". Ciò al fine di analizzare e comprendere il comportamento del corso d'acqua e dei suoi principali affluenti sia nelle fasi successive a eventi meteorici particolarmente intensi (per lo studio della formazione e propagazione delle piene), sia durante periodi siccitosi (al fine di cogliere le dinamiche di recessione delle portate e valutare gli apporti idrici di tipo sotterraneo).

A tal fine sono impiegati strumenti di misura sia di tipo "classico", dotati di mulinello elicoidale con asta a guado (fig. 6), sia di "nuova generazione", impiegando profilatori di velocità a ultrasuoni ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) installati su piccolo natante, in grado di acquisire in ogni punto della sezione fluviale oggetto di indagine il valore della velocità media e del tirante idrico, al fine di ricavare il valore della portata fluente. Se da un lato la conoscenza di soltanto alcuni valori puntuali di portata e di altezza idrometrica lungo determinate sezioni del corso d'acqua durante differenti regimi idrologici potrebbe apparire come un dato poco spendibile per la taratura e la validazione di un modello idrologico-idraulico, al contrario essa rappresenta il punto di partenza per poter ottenere delle misure di

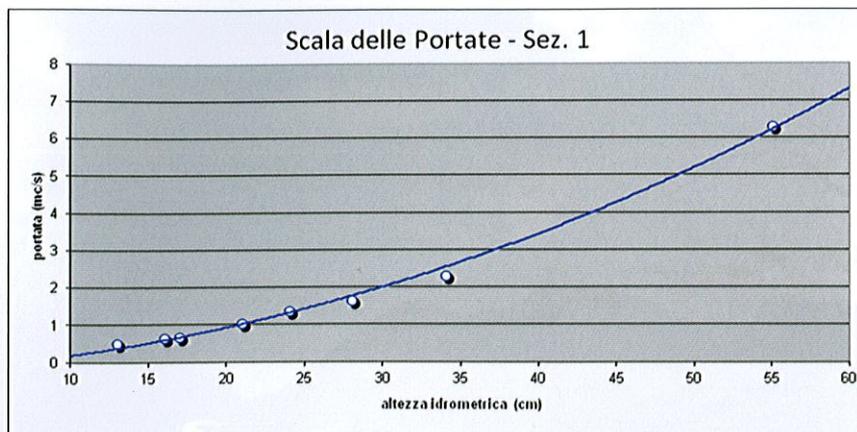


Fig. 7

portata in continuo. Infatti sulla base della conoscenza dei valori idrometrici acquisibili in continuo, ad esempio mediante la prossima installazione di misuratori di livello a immersione dotati di sensori di pressione di tipo ceramico-capacitivo e/o misuratori di livello a ultrasuoni, e grazie all'impiego di una scala dei deflussi (calcolata attraverso le misure di portata di tipo puntuale in fase di esecuzione), sarà possibile associare a ogni valore di altezza idrometrica registrato il corrispondente valore di portata. Nella figura 7 si riporta a titolo di esempio una scala delle portate che potrebbe essere ottenuta, per ciascuna delle otto sezioni individuate lungo il corso del fiume Ledra, mediante lo svolgimento di ulteriori campagne di misura delle portate di tipo puntuale, del tipo di quelle fino a oggi effettuate.

Naturalmente, avvalendosi di misure di portata in continuo lungo le otto sezioni "di controllo" prescelte, la taratura e la successiva validazione dei modelli idrologici implementati potrà essere effettuata in maniera rigorosa soltanto quando si renderà disponibile una serie storica di misure di portata sufficientemente rappresentativa.

## Conclusioni

Alla luce di quanto esposto l'obiettivo ultimo del "Progetto di Ricerca L.e.d.r.a. Project" è quello di ottenere come prodotto finale un modello numerico di tipo idrologico-idraulico "globale" rappresentativo dell'intero bacino idrografico del fiume Ledra, cioè un modello di tipo "integrato" che permetta da un lato di simulare e analizzare con estremo dettaglio a "micro scala" (ovvero a scala di centro abitato e/o zona industriale) le sin-

gole criticità derivanti dagli apporti idrici provenienti dagli insediamenti antropici e industriali insistenti sul corso d'acqua, dall'altro di riprodurre a "macro scala" (ovvero a scala di bacino idrografico) la risposta idrologica dell'intero bacino in funzione delle condizioni meteo-climatiche.

L'accoppiamento di due differenti "scale" (micro e macro) a livello di modellazione consentirà pertanto di realizzare uno strumento operativo valido sia come supporto decisionale a futuri interventi strutturali sul corso d'acqua finalizzati alla mitigazione del rischio idrogeologico, sia come strumento in grado di fornire indicazioni sulla regolazione di manufatti e opere idrauliche esistenti e interagenti con il fiume, come dispositivi di scarico e di invaso (ad esempio, sfioratori di piena e vasche di prima pioggia delle aree urbanizzate), al fine di garantire il controllo quali-quantitativo dei deflussi in un'ottica di sviluppo sostenibile e di salvaguardia del patrimonio idrico.

R.P. - A.C. - M.N. - D.G.

## Bibliografia

- BROILI L. (1984): *Cartografia Geologico Tematica del Territorio Provinciale* (Udine).
- DOWNER C., OGDEN F. (2006): *Gridded Surface Subsurface Hydrologic analysis (GSSHA) User's Manual* - US Army Corps of Engineers.
- FELDMAN A. (2000): *Hydrologic Modeling System Hec-Hms Technical Reference Manual* - US Army Corps of Engineers.
- PIERI V., DAICI A., SIMONETTI M., GOI D. (2010): *Monitoraggio della qualità delle acque del bacino del fiume Ledra*, IA-Ingegneria Ambientale, XXXIX (5):241-248.
- STEFANINI S. (1991): *Il bilancio idrologico del fiume Ledra e della falda freatica del campo di Osoppo e Gemona* - Quaderni Ente Tutela Pesca.
- PIERI V., DAICI A., GOI D., "Utilizzo degli ostracodi (Crustacea: Ostracoda) per il monitoraggio della qualità delle acque del Fiume Ledra", *Rassegna Tecnica del FVG*, (2009), 3/2009: 31-34.