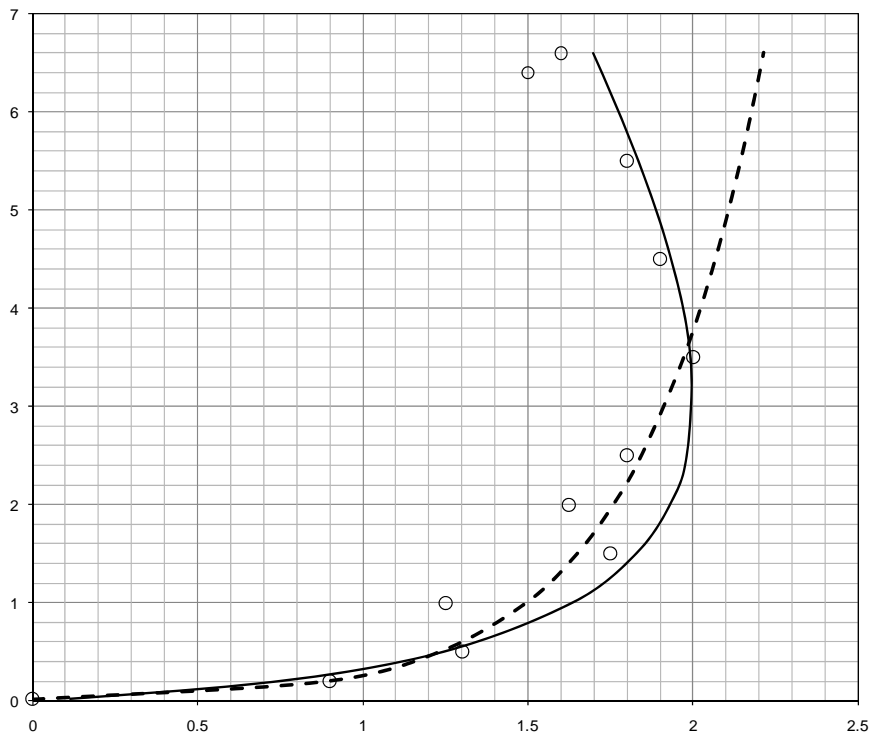




Agenzia Regionale per la Prevenzione  
e Protezione Ambientale del Veneto

# RICOSTRUZIONE DEI PROFILI DI VELOCITÀ PER LA RESTITUZIONE DI MISURE CORRENTOMETRICHE CONDOTTE IN CONDIZIONI DI PIENA



Relazione n. 01/10

**ARPAV**

**Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio**  
*Alberto Luchetta*

*U.O. Rete Idrografica Regionale*  
*Italo Saccardo*

*Autore: Marco Zasso*

Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio  
Via del Candel, 65  
32100 Belluno  
Italy  
Tel. +39 0437 098 211  
Fax +39 0437 098 200  
E-mail: [dst@arpa.veneto.it](mailto:dst@arpa.veneto.it)

**22 Febbraio 2010**

 <p>Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio U.O. Rete Idrografica Regionale</p>	<p>RICOSTRUZIONE DEI PROFILI DI VELOCITÀ PER LA RESTITUZIONE DI MISURE CORRENTOMETRICHE CONDOTTE IN CONDIZIONI DI PIENA</p>	<p>Data 22/02/2010 Revisione 0 Relazione n. 01/10</p>
--	---	---

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>METODI DI STIMA DELLA VELOCITÀ IN UNA SEZIONE .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO ENTROPICO IN FORMA SEMPLIFICATA ALLA SEZIONE DI BOARA PISANI SUL FIUME ADIGE .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>APPLICAZIONE DEL METODO DEL PUNTO UNICO ALLA SEZIONE DI BOARA PISANI SUL FIUME ADIGE.....</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO ENTROPICO IN FORMA COMPLETA ALLA SEZIONE DI FONTANELLE SUL FIUME MONTICANO.....</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>17</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>18</b>



## 1 Premessa

L'accuratezza con cui viene definita la scala di deflusso di una sezione è strettamente connessa alla numerosità delle osservazioni di portata e livello condotte sulla sezione stessa, sia in regime di magra che di piena. In particolare, per livelli idrometrici sostenuti le operazioni di misura risultano spesso poco agevoli, sia sotto l'aspetto della sicurezza degli operatori che dal punto di vista tecnico (acquisizione dei valori di tirante e di velocità).

Nel presente lavoro, alla luce di quanto testé esposto, è stata valutata la possibilità di applicare due metodologie per la ricostruzione dei profili di velocità, avendo a disposizione un numero ridotto di osservazioni correntometriche puntuali condotte in condizioni idrometriche di piena. Il campione sperimentale indagato è costituito da dati acquisiti mediante misure effettuate con mulinello ad elica montato su argano presso due sezioni strumentate con tele idrometro facenti parte della rete di telemisura (Figura 1): Boara Pisani sul fiume Adige e Fontanelle sul fiume Monticano (tributario di destra del Livenza).

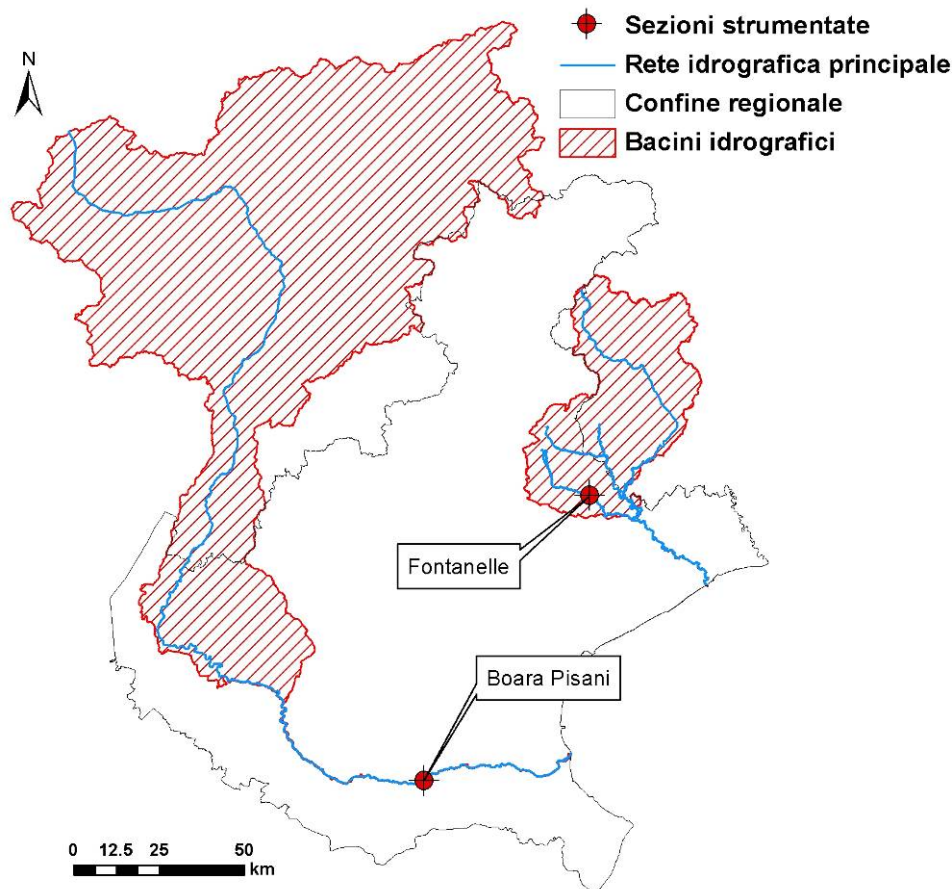



Figura 1. Inquadramento delle sezioni strumentate: Boara Pisani sul fiume Adige e Fontanelle sul Monticano

 <p>Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio U.O. Rete Idrografica Regionale</p>	<p>RICOSTRUZIONE DEI PROFILI DI VELOCITÀ PER LA RESTITUZIONE DI MISURE CORRENTOMETRICHE CONDOTTE IN CONDIZIONI DI PIENA</p>	<p>Data 22/02/2010 Revisione 0 Relazione n. 01/10</p> <hr/> <p>Pagina 2 di 18</p>
--	---	---

Un primo metodo basato sull'approccio entropico permette la stima della velocità media sulla sezione partendo da osservazioni della velocità massima puntuale e dalla calibrazione di un parametro entropico. Questo modello predittivo è stato oggetto di applicazione nella sua forma completa, come proposto da Chiu (1988), sulla sezione di Fontanelle, e in una forma semplificata, sviluppata da Moramarco *et al.* (2004) sulla sezione di Boara Pisani.

La seconda metodologia testata è invece basata sulle esperienze di Rantz (1982), e prevede la stima della velocità media sulla sezione in base alla proporzionalità tra velocità subsuperficiale o superficiale e velocità media sulla verticale. Quest'ultimo metodo, per la numerosità e la tipologia delle osservazioni correntometriche disponibili è risultato applicabile solo alla sezione di Boara Pisani.


Entrambi gli approcci sono stati preliminarmente applicati a misure correntometriche complete (costituite da osservazioni campionate lungo tutto lo sviluppo verticale del tirante), per cercare di calibrare le relazioni proposte e contemporaneamente di quantificare l'incertezza dei metodi nella stima delle variabili idrologiche coinvolte: velocità e portata. Finalmente l'applicazione è stata condotta su alcune misure di piena per entrambe le sezioni ed è stato valutato l'adattamento del dato di portata ricavato alla scala di deflusso.

## 2 Metodi di stima della velocità in una sezione

Numerose ricerche si sono proposte lo scopo di sopperire alle difficoltà insite nel reperimento dell'informazione idrometrica in campo durante il manifestarsi di eventi di piena, cercando di definire dei criteri per giungere alla stima della velocità media sulla sezione e di conseguenza alla definizione della portata fluente, avendo a disposizione un numero ridotto di osservazioni correntometriche raccolte in campo. Verranno di seguito brevemente illustrate le metodologie applicate nel presente lavoro.

L'approccio entropico trae origine dal principio di massimizzazione dell'entropia che è stato utilizzato in diversi settori di ricerca (Goldman 1953; Rao 1965) come tecnica per derivare la funzione di densità di probabilità di una variabile casuale (Chiu 1991). Il concetto cardine del principio è che in un sistema l'entropia tende a massimizzarsi (Shore e Johnson 1980) in quanto gli eventi casuali tendono a presentarsi nel maggiore disordine possibile (entro determinati vincoli assegnati).

L'entropia di una variabile aleatoria è data dalla media dell'autoinformazione della variabile stessa. L'autoinformazione di un evento è la quantità d'incertezza associata all'evento. L'entropia  $H$  della

 <p>Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio U.O. Rete Idrografica Regionale</p>	RICOSTRUZIONE DEI PROFILI DI VELOCITÀ PER LA RESTITUZIONE DI MISURE CORRENTOMETRICHE CONDOTTE IN CONDIZIONI DI PIENA	Data 22/02/2010 Revisione 0 Relazione n. 01/10
		Pagina 3 di 18

variabile casuale  $u$  (compresa tra 0 e  $u_{max}$ ) può essere espressa come:

$$1. \quad H = \sum_0^{u_{max}} p(u) \cdot \ln \frac{1}{p(u)}$$

Chiu (1987, 1988) ha trattato il problema della distribuzione delle velocità sulla sezione trasversale di un canale secondo un approccio probabilistico-entropico, pervenendo alla seguente relazione:

$$2. \quad \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0} = \int_0^u p(u) du$$

dove  $u$  è la velocità puntuale,  $\xi$  è una variabile adimensionale funzione del sistema di riferimento adottato,  $\xi_0$  e  $\xi_{max}$  sono il valore minimo e massimo di  $\xi$  in cui  $u = 0$  e  $u = u_{max}$  rispettivamente,  $u_{max}$  rappresenta la velocità massima puntuale sulla sezione trasversale e  $p(u)$  è la funzione di densità di probabilità. Considerando un campione composto da un numero sufficientemente elevato di osservazioni di  $\xi$  comprese nel range  $(\xi_0; \xi_{max})$  a cui sono associati i corrispondenti campioni di velocità, la probabilità che la velocità sia compresa tra  $u$  e  $u+du$  è pari a  $p(u)du$ . Il rapporto  $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0)$  rappresenta in pratica la funzione di distribuzione di probabilità cumulata. Utilizzando il metodo dei moltiplicatori di Lagrange, sotto i seguenti vincoli:

$$3a. \quad \int_0^{u_{max}} p(u) du = 1$$

$$3b. \quad \int_0^{u_{max}} u \cdot p(u) du = \bar{u} = \frac{Q}{A}$$


3.a l'integrazione di  $p(u)$  nell'intervallo  $(0, u_{max})$  deve essere pari all'unità e 3.b  $p(u)$  deve essere tale che la velocità media sulla sezione trasversale  $\bar{u}$  sia uguale al rapporto  $Q/A$ , nel rispetto dell'equazione di continuità, la legge di distribuzione di probabilità derivata da Chiu (1989) massimizzando l'eq. 1 è:

$$4. \quad p(u) = e^{a_1 + a_2 u}$$

Utilizzando come legge di distribuzione di probabilità l'eq. 4, ed integrando l'eq. 2, si perviene all'equazione bidimensionale di distribuzione delle velocità di Chiu (1989).

$$5. \quad \frac{u}{u_{max}} = \frac{1}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \cdot \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0} \right]$$

In cui  $u_{max}$  e  $M$  possono essere espressi in funzione dei parametri  $a_1$  e  $a_2$  di  $p(u)$ .  $M$  ( $M = a_2 u_{max}$ ) è il parametro entropico che rappresenta una misura dell'entropia. L'entropia di  $p(u/u_{max})$  aumenta quando  $M$  decresce. Quando  $M = 0$ ,  $u/u_{max}$  cresce linearmente con  $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0)$ ; quando  $M$  tende ad  $\infty$   $u/u_{max}$  diventa costante ed invariante con  $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0)$ . In base alla formulazione probabilistica usata per definire l'equazione 5, la velocità media sulla sezione trasversale  $\bar{u}$ , può essere derivata analiticamente, ed espressa dalla seguente relazione:

 <p>Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio U.O. Rete Idrografica Regionale</p>	<p>RICOSTRUZIONE DEI PROFILI DI VELOCITÀ PER LA RESTITUZIONE DI MISURE CORRENTOMETRICHE CONDOTTE IN CONDIZIONI DI PIENA</p>	<p>Data 22/02/2010 Revisione 0 Relazione n. 01/10</p> <hr/> <p>Pagina 4 di 18</p>
--	---	---

$$6. \quad \bar{u} = \int_0^{u_{max}} u p(u) du = \Phi(M) u_{max}$$

in cui

$$7. \quad \Phi(M) = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M}$$

L'equazione 6 mostra come  $\bar{u}$  possa essere ricavata, noto il parametro  $M$  e la velocità massima  $u_{max}$ , e come lo stesso parametro  $M$  sia legato alla velocità media e massima della sezione trasversale da una relazione lineare. È stato infatti dimostrato sperimentalmente (Chiu, 1989, Xia, 1997, Moramarco *et al.* 2004) come sussista, anche per sezioni fluviali, una correlazione lineare tra la velocità media e la velocità massima puntuale.

Nel caso di canali larghi prossimi alla forma rettangolare, lungo la verticale posta al centro della sezione, il rapporto  $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0)$  può essere sostituito dal rapporto  $z/y$ , con  $z$  coordinata spaziale che indica la distanza dal fondo e  $y$  il tirante idrico, in quanto, le grandezze  $\xi_{max}$  e  $\xi_0$  possono essere poste rispettivamente uguali ad uno e zero (Chiu e Chiou, 1986). In canali più stretti o se la velocità massima si realizza sotto la superficie libera, ad una profondità misurata dal pelo libero  $hv$ , la coordinata  $\xi$ , per la verticale dove si concretizza la velocità massima, può essere espressa nella forma seguente:


$$8. \quad \xi = \frac{z}{y - hv} e^{\left(1 - \frac{z}{y - hv}\right)}$$

Un modello meno complesso di quello proposto da Chiu è stato sviluppato da Moramarco *et al.* (2004). Gli Autori hanno assunto che la formulazione espressa dall'eq. 5, scritta per la verticale in cui si verifica  $u_{max}$ , possa essere applicata alle altre verticali nella seguente forma:

$$9. \quad u_v(z) = \frac{u_{max_v}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \cdot \frac{z}{y - hv} \cdot e^{\left(1 - \frac{z}{y - hv}\right)} \right]$$

in cui  $hv$  è la profondità sotto la verticale dove si verifica  $u_{max_v}$  (velocità massima puntuale misurata sulla verticale) e  $z$  è la distanza verticale misurata dal fondo del canale.

Una seconda metodologia, applicata nella seguente lavoro, deriva dalle esperienze condotte in altre ricerche (Rantz *et al.*, 1982; ENEL, 1995) che si sono proposte di derivare il valore della velocità media sulla verticale basandosi sulla proporzionalità tra questa e la velocità superficiale o sub-superficiale. Questo approccio già sperimentato positivamente in altre esperienze (ARPAV, 2006) risulta di agevole applicazione, e permette, nota solamente la velocità puntuale misurata in superficie o ad una distanza nota sotto il pelo libero per diverse verticali, di risalire alla velocità

 <p>Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio U.O. Rete Idrografica Regionale</p>	<p>RICOSTRUZIONE DEI PROFILI DI VELOCITÀ PER LA RESTITUZIONE DI MISURE CORRENTOMETRICHE CONDOTTE IN CONDIZIONI DI PIENA</p>	<p>Data 22/02/2010 Revisione 0 Relazione n. 01/10</p> <hr/> <p>Pagina 5 di 18</p>
--	---	---

media su quest'ultime, avendo, sulla scorta di altre osservazioni, calibrato il coefficiente di proporzionalità  $k$  che lega queste due grandezze. Rantz (1982) propone per gli alvei naturali l'utilizzo di un coefficiente di proporzionalità tra velocità superficiale e media compreso tra 0.85 e 0.86, come valore medio a livello di sezione, assai simile al range proposto dalla norma ISO 748 (2007) che considera il coefficiente  $k$  compreso generalmente tra 0.84 e 0.90, il cui limite superiore si può utilizzare nel caso di alvei con fondo a ridotta scabrezza. Sempre Rantz (1982) afferma inoltre che in prossimità delle sponde il valore della costante di proporzionalità può avvicinarsi o superare l'unità, in ragione delle correnti secondarie che tendono ad abbassare la posizione relativa del massimo di velocità, fenomeno che è stato individuato anche in altre ricerche condotte da ARPAV (2006) ed indagato più dettagliatamente, per corsi d'acqua con alvei ghiaiosi, nel lavoro di Ferro e Baiamonte, (1994).

### **3 Applicazione dell'approccio entropico in forma semplificata alla sezione di Boara Pisani sul fiume Adige**

Sulla scorta delle esperienze condotte da Moramarco *et al.* (2004) e Burnelli *et al.* (2006), l'equazione 9 è stata dapprima applicata a tre misure correntometriche complete, eseguite sulla sezione di Boara Pisani sul fiume Adige, (Figura 2) di cui era disponibile il campionamento delle velocità di almeno quattro punti per ogni verticale di misura. Questa operazione si è resa necessaria per valutare l'attendibilità dell'equazione 9 nella previsione della velocità media sulla verticale. La stessa equazione è stata poi utilizzata per risalire alla velocità media sulla sezione trasversale relativa alla misura correntometrica eseguita durante un evento di piena, il 6 novembre 2008, in cui sono stati campionati tre punti velocità per ogni verticale di misura.



**Figura 2. Panoramica del ponte di Boara sul fiume Adige**



Per poter applicare l'equazione 9 è necessario oltre alla conoscenza della velocità massima, o presunta tale, per ogni verticale, la conoscenza del parametro entropico  $M$  che può essere desunto sulla base della relazione lineare entropica; è stata quindi verificata la linearità della correlazione tra la velocità media e massima sulla sezione trasversale. Poiché la sezione è divisa dalle pile di un ponte in tre sottosezioni (Figura 2), i tronchi fluviali sono stati trattati separatamente e numerati progressivamente partendo dalla sinistra idrografica.

In Tabella 1 sono riassunti i valori di velocità media e massima, la portata e l'altezza idrometrica per 10 misure condotte a Boara Pisani dal 2004 al 2009 ed utilizzate per l'estrapolazione del parametro entropico  $M$  indispensabile per ricostruire il profilo delle velocità.

Data	I° tronco		II° tronco		III° tronco		H idr. (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
	$\bar{u}$ (m/s)	$u_{max}$ (m/s)	$\bar{u}$ (m/s)	$u_{max}$ (m/s)	$\bar{u}$ (m/s)	$U_{max}$ (m/s)		
7-apr-08	0.239	0.345	0.723	1.13	0.637	1.065	-4.11	45
27-ott-09	0.741	1.25	0.882	1.234	0.743	1.274	-3.58	84
19-gen-08	1.043	1.562	1.11	1.57	0.932	1.626	-3.22	135
11-mag-06	1.263	1.703	1.206	1.907	0.963	1.609	-2.87	222
14-apr-08	1.287	1.826	1.15	1.77	0.808	1.602	-2.63	199
18-ago-08	1.172	1.618	1.216	1.626	0.864	1.442	-2.54	215
11-feb-09	0.920	1.226	0.880	1.218	0.708	1.114	-2.23	182
23-apr-09	1.412	2.229	1.341	1.746	0.964	1.642	-2.18	274
2-nov-04	1.351	1.777	1.349	1.838	1.113	1.646	-1.26	398
9-giu-08	1.492	1.922	1.458	1.954	1.082	1.682	-0.58	509

**Tabella 1. Riepilogo delle velocità massime e medie rilevate durante le 10 misure utilizzate per stimare il parametro  $M$  sulla base dell'eq. 6. Sono riportate nelle ultime due colonne l'altezza idrometrica media registrata dall'idrometro di Boara Pisani e la relativa portata.**

In Figura 3 si riportano in forma grafica i valori della velocità media sulla sezione trasversale in funzione della velocità massima puntuale rilevata per i tre tronchi fluviali. Viene inoltre esplicitata l'equazione di regressione estrapolata considerando l'intero campione sperimentale, ed il relativo coefficiente di determinazione.

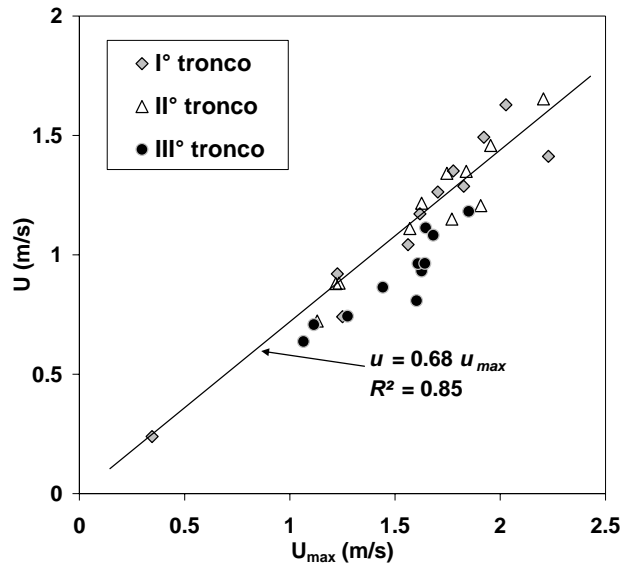


Figura 3. Relazione lineare tra velocità media e massima misurate sulle tre sottosezioni in cui viene diviso l'alveo dell'Adige a Boara Pisani.

L'approccio utilizzato ha portato all'individuazione di quattro parametri entropici sulla base del coefficiente angolare della relazione lineare che intercorre tra la velocità massima puntuale e media, i cui valori sono riportati in Tabella 2.

	$\bar{u} / u_{max}$	$M$	$R^2$
I° tronco	0.720	3.01	0.924
II° tronco	0.715	2.92	0.910
III° tronco	0.605	1.29	0.826
Intero campione	0.684	2.42	0.853

Tabella 2. Parametro entropico  $M$  stimato sulla base del coefficiente angolare della relazione tra  $\bar{u}$  e  $u_{max}$

I valori ottenuti per il primo e secondo tronco si discostano poco l'uno dall'altro, mentre il terzo tronco manifesta un'entropia maggiore. I valori ottenuti sono confrontabili con quelli ricavati da altri Autori in diverse esperienze e riportati in Tabella 3.

Autori	Area di indagine	$\bar{u} / u_{max}$
Xia (1994)	Mississippi (tratti rettilinei ÷ tratti in curva)	0.685 ÷ 0.806
Moramarco <i>et al.</i> (2004)	Bacino alto Tevere	0.667
Burnelli <i>et al.</i> (2006)	Po a Pontelagoscuro	0.668
D'Agostino e Zasso (2008)	Bacino alto Piave (anche dati in macroscabrezza)	0.555

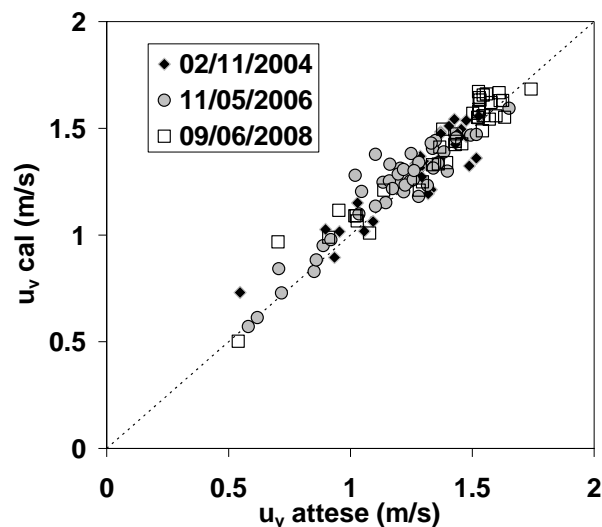
Tabella 3. Valori del rapporto  $\bar{u} / u_{max}$  ricavati da diversi Autori

Al fine di valutare la bontà previsionale dell'approccio proposto da Moramarco *et al.*, (2004),



l'equazione 9 è stata utilizzata per ricostruire i profili di velocità di tre misure correntometriche complete (9-giu-08, 2-nov-04, 11-mag-06) ponendo il parametro entropico  $M$  costante su tutta la sezione trasversale, ed uguale al valore ricavato considerando l'intero campione sperimentale disponibile ( $M = 2.42$ ; Tabella 2). La velocità massima è stata posta pari al valore massimo misurato lungo il profilo di ogni verticale. La variazione percentuale espressa in termini assoluti, tra i valori puntuali di velocità previsti e quelli misurati, è risultata, sempre per le tre misure, del 12.5 %, 13.9% e 15.3% rispettivamente.

Dall'equazione 9 è possibile risalire al valore di velocità medio sulla verticale che permette la stima della portata liquida nota la geometria dell'alveo. L'accuratezza nella stima della velocità media delle 118 verticali relative ai tre eventi è messa in luce del grafico di Figura 4, dove si mostra un confronto tra i valori attesi (calcolati impiegando tutte le osservazioni disponibili) e quelli stimati mediante l'approccio entropico-probabilistico. Lo scarto medio assoluto è risultato abbastanza contenuto e pari, prendendo in considerazione la totalità delle verticali, al 5.75%.



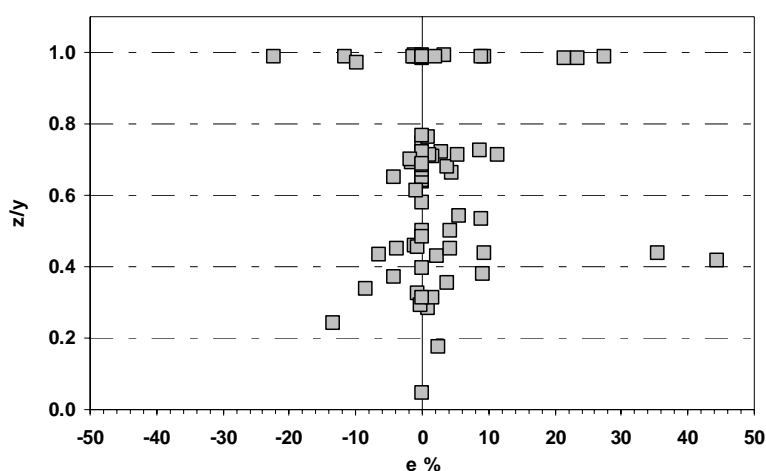
**Figura 4** Confronto grafico tra i valori attesi di velocità media sulla verticale e quelli ottenuti integrando lungo il profilo l'eq. 9.

Per le tre misure, utilizzando il metodo velocità-area è stata ricavata la portata per i tre tronchi fluviali, la sommatoria dei valori ottenuti per ciascuna sottosezione è stata confrontata con il valore di portata ricavato dalla restituzione della misura fatta utilizzando tutti i punti di campionamento della velocità disponibili (Tabella 4).

Misure	Q (m <sup>3</sup> /s) eq. 9	Q (m <sup>3</sup> /s) Restituzione completa	variazione %
02/11/2004	511.95	508.76	0.62
10/05/2009	229.89	222.49	3.32
09/06/2008	385.15	398.01	-3.23

**Tabella 4. Confronto tra i valori di portata ricavati dalla restituzione completa delle misure correntometriche e quelli dedotti applicando l'eq. 9 per la stima della velocità media per ogni verticale.**

L'equazione 9 è stata applicata utilizzando i valori massimi di velocità campionati per diverse verticali durante un evento di piena verificatosi il 6/11/2008. Per ogni verticale di misura furono rilevati in campo tre punti velocità, ad eccezione di due verticali su cui si campionarono due soli valori, producendo un campione di 79 punti velocità distribuiti su 27 verticali. Come per l'analisi di applicabilità condotta sulle misure correntometriche complete, e descritta precedentemente, furono considerati i valori massimi campionati, come massimi assoluti di velocità per ogni verticale. Il valore del tirante e l'area liquida sono stati estratti dal rilievo topografico della sezione trasversale, nota l'altezza idrometrica rilevata dal teleidrometro. Il valore del parametro entropico per l'intera sezione è stato posto pari a quello derivato dalla regressione lineare effettuata su tutte le coppie  $u_{max}$ ,  $u$  disponibili e pari a 2.42 (Tabella 2). L'applicazione dell'eq. 9 ha prodotto uno scarto medio assoluto nella stima della velocità puntuali pari al 5.35%. Nel grafico di Figura 5 si mostra la distribuzione lungo il profilo degli errori percentuali nella stima di quest'ultime. Va sottolineato che, durante la piena del 6 novembre, le velocità furono rilevate quasi esclusivamente a profondità relative maggiori di 0.2 y, di conseguenza non è stato possibile quantificare l'errore commesso nella stima delle velocità puntuali più prossime al fondo.



**Figura 5 Differenza percentuale nella stima delle velocità puntuali mediante l'applicazione dell'equazione 6**

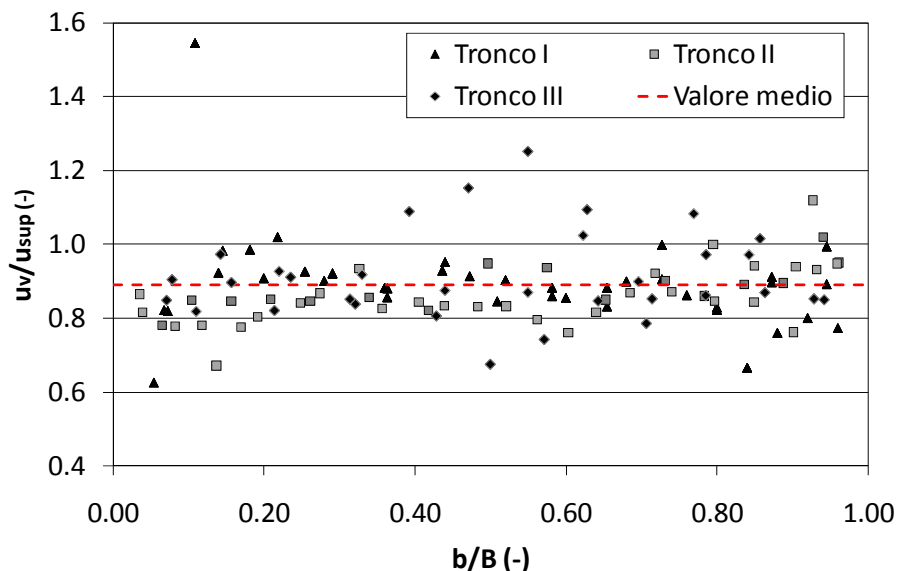


Sulla base delle velocità medie stimate lungo ogni verticale è stata calcolata la velocità media con il metodo area-velocità e, nota l'area liquida, il valore della portata, che è risultato pari a 699.46 m<sup>3</sup>/s.

#### 4 Applicazione del metodo del punto unico alla sezione di Boara Pisani sul fiume Adige

Per l'applicazione del metodo del punto unico si è resa necessaria la calibrazione del coefficiente  $k$ , che lega la velocità media sulla verticale a quella in superficie misurata in campo. Per tarare questo parametro sono stati considerati i valori di velocità acquisiti a 0.06 m sotto il pelo libero durante tre misure correntometriche di morbida effettuate il 2 novembre 2004, l'11 maggio 2006 e il 9 giugno 2008, sulla sezione di Boara Pisani con i seguenti livelli idrometrici: -1.26 m, -2.87 m e -0.58 m.

Le medie del rapporto tra la velocità media sulla verticale e quella superficiale sono risultate pari a 0.90, 0.89 e 0.88 rispettivamente per le tre misure, con deviazione standard, compresa tra 0.07 e 0.14. I valori ottenuti sono confrontabili con quelli proposti in letteratura (Rantz, 1982) e dalla norma ISO 748 (2007). La dispersione dei singoli  $k$  rispetto alla media è riportata nel grafico di Figura 6. Si osserva come la presenza delle pile alteri leggermente la distribuzione dei valori sulla sezione trasversale se confrontata con quella definita per una sezione indisturbata, dove solitamente si manifesta un incremento del rapporto in prossimità delle sponde.



**Figura 6. Dispersione dei valori del rapporto tra velocità media sulla verticale e velocità superficiale in funzione alla larghezza relativa (rapporto tra la distanza dalla sponda della verticale di misura ( $b$ ) e la larghezza del pelo libero ( $B$ ) calcolato per ogni singolo tronco fluviale).**

Per l'applicazione corrente, vista la contenuta variazione del valore medio del parametro  $k$  tra le tre misure considerate, afferenti a diversi livelli idrometrici, ed anche alla luce dei risultati conseguiti



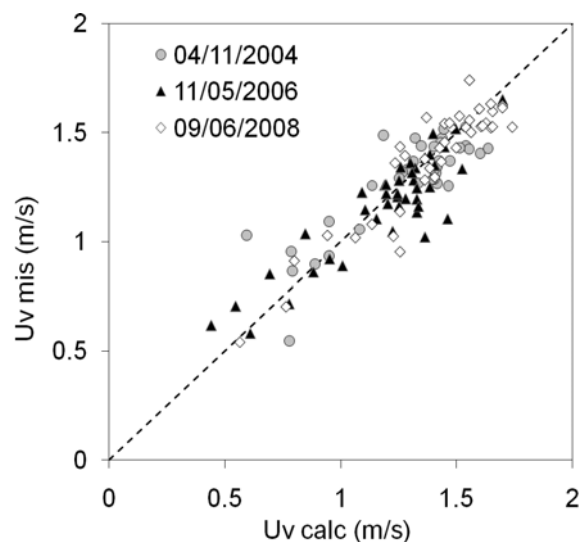
da ARPAV (2006) in un'indagine simile condotta sul Brenta, si è scelto di utilizzare come  $k$  il valore medio complessivo e pari a 0.89, senza far ricorso ad algoritmi di interpolazione per la definizione del coefficiente a livello di singola verticale.

L'utilizzo del valore medio del parametro di proporzionalità ( $k=0.89$ ) per la stima della velocità media sulla verticale ha permesso di ricavare la portata fluente per le tre misure correntometriche complete e di confrontare il valore ottenuto con quello desunto dalla restituzione. (Tabella 5).

**Tabella 5 Confronto tra i valori di portata ricavati dalla restituzione completa delle misure correntometriche e quelli dedotti applicando il coefficiente di proporzionalità  $k$  per la stima della velocità media per ogni verticale.**

Misure	Q (m <sup>3</sup> /s) eq. 6	Q (m <sup>3</sup> /s) Restituzione completa	variazione %
02/11/2004	514.93	508.76	1.21
10/05/2009	230.15	222.49	3.44
09/06/2008	386.68	398.01	-2.85

Un confronto grafico tra le velocità medie sulla verticale stimate utilizzando il parametro di proporzionalità e quelle calcolate con il metodo per integrazione dei punti velocità misurati lungo tutto il profilo è riportato in Figura 7.

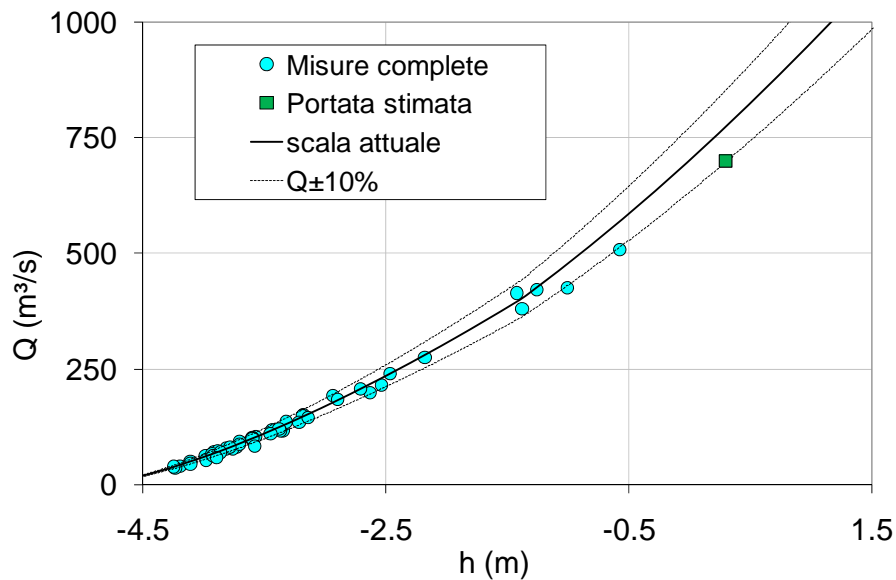


**Figura 7. Confronto tra le velocità medie sulla verticale calcolate utilizzando il parametro di proporzionalità medio ( $k=0.89$ ) tra velocità superficiale e media ( $U_v$  calc) e quelle calcolate con il metodo per integrazione dei punti velocità misurati lungo tutto il profilo ( $U_v$  mis).**


Applicando la metodologia sopradescritta alla misura del 6 novembre 2008, ovvero moltiplicando il valore della velocità misurata a 0.06 m sotto il pelo libero per il parametro di proporzionalità  $k$  posto pari a 0.89, al fine di stimare la velocità media per ogni verticale, si è desunta una portata liquida pari 690.54 m<sup>3</sup>/s.



In Figura 8 è rappresentato graficamente il valore della portata stimata con le due metodologie applicate (entropico – probabilistica, metodo del punto unico) che è risultato praticamente indentico.

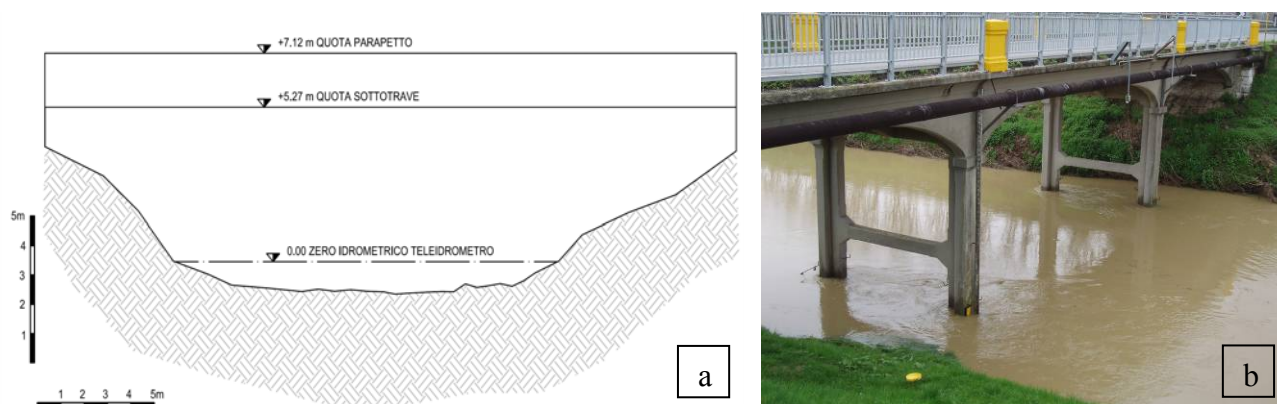


**Figura 8. Adattamento della portata stimata alla scala di deflusso esistente per la sezione di Boara Pisani. Alla luce della non significativa differenza tra la stima condotta con le due diverse metodologie, il valore nel grafico può essere considerato rappresentativo di entrambi gli approcci.**

 Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio U.O. Rete Idrografica Regionale	RICOSTRUZIONE DEI PROFILI DI VELOCITÀ PER LA RESTITUZIONE DI MISURE CORRENTOMETRICHE CONDOTTE IN CONDIZIONI DI PIENA	Data 22/02/2010 Revisione 0 Relazione n. 01/10
		Pagina 13 di 18

## 5 Applicazione dell'approccio entropico in forma completa alla sezione di Fontanelle sul fiume Monticano

La sezione di Fontanelle, presenta una geometria regolare, tipica della rete idrografica di pianura (Figura 9a). Il campo di moto della corrente risente, anche se in modo marginale, della presenza in alveo di due pile di sostegno ad un'opera di attraversamento dove è installato il sensore ad ultrasuoni per la lettura del livello idrometrico (Figura 9b).



**Figura 9.** Sezione trasversale del Monticano a Fontanelle (a), particolare delle pile del ponte sul quale è fissato l'idrometro ad ultrasuoni per la lettura del livello (b).

Il giorno 29 aprile 2008 è stata eseguita sulla sezione di Fontanelle una misura di portata in condizioni di piena. Poiché i tempi di risposta agli input pluviometrici del bacino sotteso, sono molto ridotti, si è assistito ad un repentino abbassamento (si era nella fase discendente dell'idrogramma di piena) del livello idrometrico nel corso della misura. Analoga situazione si è verificata per la misura effettuata il 23 dicembre dello stesso anno, anche se con una diminuzione idrometrica, durante l'esecuzione di quest'ultima, meno significativa.

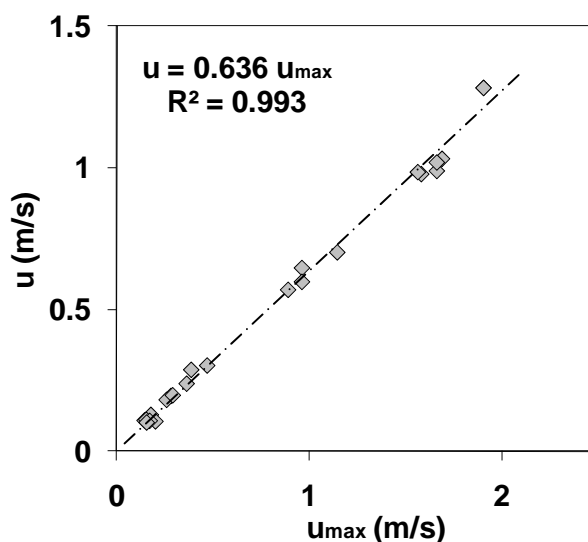
Per estrapolare dai dati rilevati in campo un valore di portata a cui associare un riferimento idrometrico univoco si è cercato di valutare la possibilità di applicazione dell'equazione 5, che permette, una volta calibrata, la ricostruzione dei profili verticali di velocità e la conseguente stima della velocità media sulla sezione, nota solamente la velocità massima puntuale e la posizione in cui questa si realizza.

L'equazione 5 per essere applicata richiede la determinazione del parametro entropico  $M$  e la valutazione del valore delle coordinate adimensionali curvilinee di isovelocità  $\xi$ . Nei corsi d'acqua naturali, il valore della velocità massima si presenta solitamente sotto la superficie, ed  $\xi$  può essere desunta sulla base della formulazione proposta da Chiu e Chiou (1986) che lega il valore della



coordinata ad alcune grandezze idrauliche, espresse secondo un sistema di riferimento avente origine sulla verticale in cui si concretizza la velocità massima, e ad alcuni parametri funzione delle caratteristiche geometriche del canale.

Per la stima del parametro entropico  $M$  della sezione sono stati utilizzati i valori di velocità media e massima rilevati durante 23 misure condotte sulla stessa sezione dal 2005 al 2009. La relazione lineare esistente tra velocità media e massima è stata confermata dai dati sperimentali anche per la sezione di Fontanelle, ottenendo una equazione con un coefficiente angolare pari a 0.636 (Figura 10). Per l'analisi statistica si sono utilizzate 23 coppie di valori  $u-u_{max}$  rilevati con portate comprese tra 1.25 m<sup>3</sup>/s e 53.2 m<sup>3</sup>/s. Sulla base dell'equazione 7 è stato derivato il parametro entropico  $M$  risultato pari a 1.706.



**Figura 10. Confronto grafico e retta di regressione passante per l'origine tra le coppie di valori velocità media – velocità massima usate per la determinazione del parametro entropico sulla sezione di Fontanelle**

Per la definizione delle caratteristiche geometriche della sezione è stata utilizzato un rilievo topografico del 2007. La valutazione dei parametri per la calibrazione delle coordinate  $\zeta$  è stata fatta seguendo l'approccio proposto da Chiu e Chiou (1986) e da Hsu (2004).

La calibrazione è stata condotta applicando l'equazione 5 a tre misure eseguite con il mulinello mediante calata con argano da ponte, in modo da ridurre gli scarti tra la portata calcolata utilizzando le velocità ricostruite dal modello e quella restituita considerando l'intero campione di osservazioni correntometriche.

Trattasi delle misure eseguite sulla sezione con i livelli idrometrici più elevati, compatibilmente all'epoca in cui si è svolto il rilievo topografico. In Tabella 6 sono riassunti i risultati ottenuti per le misure oggetto di analisi.

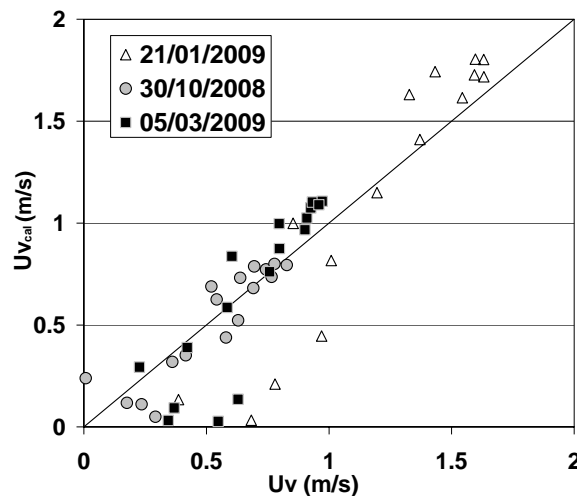


Data	H <sub>idr</sub> inizio (m)	H <sub>idr</sub> fine (m)	Q <sub>mis</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>calc</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Scarto (m <sup>3</sup> /s)	variazione %
05/03/2009	1.31	1.26	25.65	26.36	0.71	2.76%
30/10/2008	0.80	0.66	14.53	14.15	-0.38	-2.61%
21/01/2009	1.76	1.54	53.22	52.97	-0.25	-0.48%

**Tabella 6. Confronto tra i valori di portata restituiti dalle misure correntometriche e quelli dedotti applicando l'equazione 6.**

Per valutare la bontà del modello applicato nella previsione della velocità, è stato fatto un confronto grafico tra i valori di velocità media sulla verticale, ricavati per interpolazione dei valori puntuali rilevati in campo, e quelli ottenuti integrando i valori previsti dall'equazione 5 lungo il profilo verticale (Figura 11). Per le misure indagate si osserva una maggiore discordanza tra valori osservati e previsti per bassi valori di velocità (<0.5 m/s) che solitamente si manifestano in prossimità delle sponde, e che tuttavia influenzano meno sensibilmente il valore della portata liquida. Va inoltre ricordato come la presenza delle pile, presenti proprio nella zona di sponda, influenzi il campo di moto a valle di quest'ultime. Peraltro una scarsa accuratezza del modello nella ricostruzione dei profili in prossimità delle sponde fluviali era già stata messa in evidenza anche da Moramarco *et al.* (2004).

Particolare attenzione va posta alla variazione idrometrica che si è verificata durante le misure usate per la calibrazione dei parametri (Tabella 6). Incrementi o decrementi del pelo libero, provocano infatti una modificazione delle condizioni idrauliche sulla sezione trasversale. In queste situazioni, campionando le velocità puntuali sulle diverse verticali, non risulta spesso agevole ottenere un'immagine istantanea della distribuzione delle velocità.



**Figura 11. Confronto grafico tra i valori della velocità media sulla verticale ricavati dalle velocità puntuali campionate e quelli ricavati integrando l'eq. 5 lungo il tirante.**

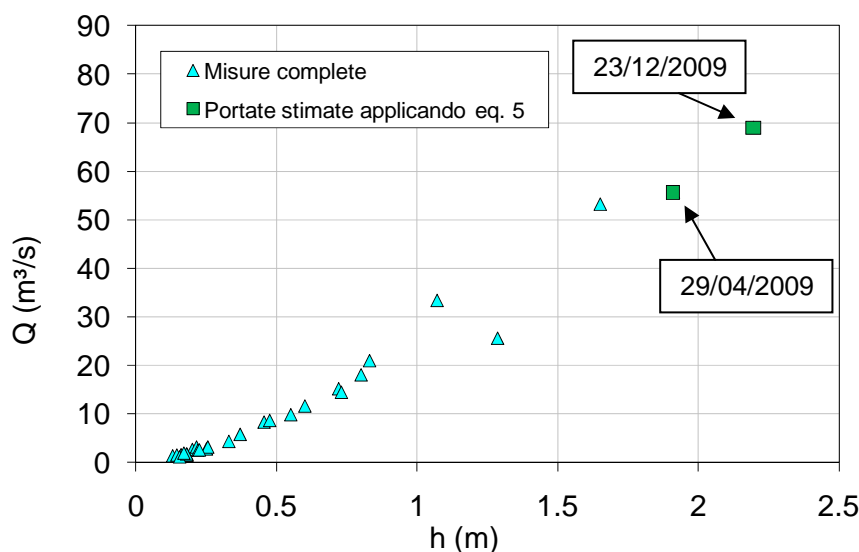


Le misure di campo effettuate durante le piene di aprile e dicembre 2009 sono caratterizzate da una informazione correntometrica ridotta. Per ciascuna di queste si dispone solamente delle velocità misurate in prossimità del pelo libero simultaneamente ad una significativa diminuzione di livello idrometrico. Per poter applicare a queste misure il modello entropico, si è reso preventivamente necessario definire un livello idrometrico di riferimento (rispetto allo zero del teleidrometro), che permettesse di effettuare una caratterizzazione geometrica ed idrologica della sezione (Tabella 7). Questo livello è stato individuato in relazione alla posizione della verticale dove si è concretizzata la massima velocità puntuale misurata. Sulla base di queste considerazioni per la misura effettuata il 29 aprile il livello idrometrico di riferimento è stato posto pari a 1.91 m rispetto allo zero locale. Mentre per quella condotta il 23 dicembre, è stato preso un livello di riferimento pari a 2.19 m rispetto allo zero idrometrico.


Data	H <sub>idr</sub> inizio (m)	H <sub>idr</sub> fine (m)	H <sub>idr</sub> rifer. (m)	B (m)	u <sub>max</sub> (m/s)	A (m <sup>2</sup> )
29/04/2009	2.49	1.38	1.91	22.05	1.763	48.95
23/12/2009	2.34	2.05	2.19	23.32	1.932	55.31

**Tabella 7. Riassunto delle variabili idrauliche definite sulla base dei livelli idrometrici raggiunti simultaneamente al rilievo in campo della velocità massima**

Applicando l'equazione 5 sono state stimate le velocità medie e con il metodo area – velocità si è infine definito il valore di portata, che è risultato pari a 55.72 m<sup>3</sup>/s per la misura del 29 aprile e 69.00 m<sup>3</sup>/s per quella del 23 dicembre. L'adattamento alla scala di deflusso esistente è illustrato graficamente in Figura 12.




**Figura 12. Scala delle portate per l'idrometro di Fontanelle sul fiume Monticano: misure effettuate (indicatore grafico triangolare), portate stimate applicando l'eq. 5, utilizzando il solo valore di velocità massima puntuale misurato durante gli eventi del 29/04/2009 ed il 23/12/2009 (indicatore grafico quadrato).**

 <p>Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio U.O. Rete Idrografica Regionale</p>	<p>RICOSTRUZIONE DEI PROFILI DI VELOCITÀ PER LA RESTITUZIONE DI MISURE CORRENTOMETRICHE CONDOTTE IN CONDIZIONI DI PIENA</p>	<p>Data 22/02/2010 Revisione 0 Relazione n. 01/10</p> <hr/> <p>Pagina 17 di 18</p>
--	---	--

## 6 Conclusioni

In riferimento alla sezione di Boara Pisani l'applicazione dei due diversi approcci, metodo del punto unico e metodo entropico semplificato, ha condotto a risultati pressoché identici con una differenza assoluta di circa  $9 \text{ m}^3/\text{s}$ . Per entrambe le proposte metodologiche, l'accuratezza della stima risente del numero di verticali campionate e richiede un certo numero di misure complete per la calibrazione del parametro  $M$  e del coefficiente  $k$ .

Per la sezione di Fontanelle l'applicazione del metodo entropico nella sua forma completa, dopo opportuna calibrazione, ha permesso la stima della portata liquida per due eventi di piena, conoscendo solo il valore puntuale di velocità massima, la posizione sulla sezione in cui questo si concretizza e la geometria della sezione. I valori ottenuti sembrano ben adattarsi all'andamento della scala di deflusso, tuttavia si ritiene appropriato un riscontro empirico dei risultati, effettuando altre misure con valori di livello idrometrico prossimi a quelli verificatisi nelle due piene analizzate, al fine di poter meglio valutare il margine di incertezza del metodo di stima utilizzato.

 <p>Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio U.O. Rete Idrografica Regionale</p>	<p>RICOSTRUZIONE DEI PROFILI DI VELOCITÀ PER LA RESTITUZIONE DI MISURE CORRENTOMETRICHE CONDOTTE IN CONDIZIONI DI PIENA</p>	<p>Data 22/02/2010 Revisione 0 Relazione n. 01/10</p> <hr/> <p>Pagina 18 di 18</p>
--	---	--

## Bibliografia

- ARPAV (2006). Considerazioni sulla scala di deflusso del fiume Brenta a Barziza. U.O. Rete Idrografica Regionale Rel. n° 04/06.
- Burnelli A. Moramarco T. e Saltalippi, C. (2006). Valutazione dei profili di velocità in canali naturali per eventi di piena eccezionali, *XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Roma.
- Chiu, L.C. (1987). Entropy and probability concepts in hydraulics, *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(5), 583-600.
- Chiu, L.C. (1988). Entropy and 2-D velocity in open channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(7), 738-756.
- Chiu, L.C. (1989). Velocity distribution in open channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(5), 576-594.
- Chiu, L.C. (1991). Application of entropy concept in open channel flow study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(5), 615-628.
- Chiu, L.C., Chiou J.D. (1986). Structure of 3-D flow in rectangular channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 112(11), 1050-1068.
- D'Agostino V. e Zasso, M. (2008). Analisi dei profili di velocità nei torrenti montani mediante misure correntometriche. *XXXI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Perugia.
- ENEL (1995). Direzione Studi e ricerche. *Manuale per il monitoraggio idrografico*.
- Goldman, S. (1953). *Information theory*. Prentice-Hall, Inc., New York, N.Y.
- Ferro, V., e Baiamonte, G. (1994). Flow velocity profiles in gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(1), 60-80.
- Hsu S.M (2004). Probability-based simulation of 2-D velocity distribution and discharge in open channel flow. *School of Engineering*, University of Pittsburg.
- ISO 748 (2007). Hydrometry – Measurement of liquid flow in open channel using current-meter or floats.
- Moramarco, T., Saltalippi, C. e Singh, V.S. (2004). Estimation of mean velocity in natural channels based on Chiu's velocity distribution equation, *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(1), 42-50.
- Rantz, S.E. et al. (1982), Measurement and computation of streamflow: Vol. 1, Measurement of stage, and discharge U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2175.
- Rao, C. R. (1965). *Linear statistical inference and its applications*. John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y.
- Shore, J. E., e Johnson, R. W. (1980). "Axiomatic derivation of the principle of maximum entropy and the principle of minimum cross-entropy." *Trans. of Information Theory*, 1, 11-26.
- Xia, R. (1997). Relation between mean and maximum velocities in a natural river, *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), 720-23.



ARPAV  
Agenzia Regionale  
per la Prevenzione e  
Protezione Ambientale  
del Veneto

*Direzione Generale*

*Via Matteotti, 27*

*35131 Padova*

Tel. +39 049 82 39301

Fax. +39 049 66 0966

E-mail [urp@arpa.veneto.it](mailto:urp@arpa.veneto.it)

[www.arpa.veneto.it](http://www.arpa.veneto.it)