

2° Giornata di Studio

Il monitoraggio idrotorbidimetrico dei corsi d'acqua
per la stima dei processi erosivi e il bilancio dei solidi sospesi

8 ottobre 2004

**Studio delle portate alla foce del Reno
(chiusa di Volta Scirocco) dal 1995
e validazione del modello di calcolo con misure dirette**

Ing. Piero Matterelli *, Ing. Daniele Bottau *,
Dott.ssa Donatella Pavanelli **, Ing. Andrea Pagliarani **, Ing. Alessandro Bigi **

* CER Consorzio Canale Emiliano Romagnolo
** DEIAgra, Facoltà di Agraria, Università di Bologna

Introduzione

Il presente studio si inserisce nell'ambito di un più ampio progetto di ricerca che ha come oggetto lo studio idrologico e dei processi erosivi di alcuni degli affluenti principali del fiume Reno attraverso il monitoraggio in continuo degli afflussi, deflussi e trasporto torbido.

Il progetto, avviato nel 1996, si avvale della collaborazione e del finanziamento dell'Autorità di Bacino del Reno (organo di intesa interregionale tra Emilia-Romagna e Toscana), del supporto dell'A.R.P.A. (Azienda Regionale Prevenzione Ambientale) e del C.E.R. (Consorzio di bonifica di secondo grado per il Canale Emiliano Romagnolo).

A partire dal febbraio del 2003 si è aggiunto, alle stazioni già funzionanti in corrispondenza di tre dei principali affluenti alla chiusura dei rispettivi bacini montani (Lavino, Savena e Sillaro, già attrezzati con idrometro ad ultrasuoni e campionatore automatico), un nuovo monitoraggio del Reno a breve distanza dalla foce in Adriatico, nei pressi di Mandriole di Sant'Alberto (RA).

Obiettivo principale del programma, specificatamente per la stazione alla foce del Reno, è lo studio del bilancio dei solidi trasportati a mare, in sospensione e sul fondo, in funzione del ripascimento delle coste.

A tale fine si è posta l'esigenza di arrivare ad una stima quanto più affidabile della portata del Reno nella sezione monitorata, stima necessaria per arrivare al calcolo del deflusso torbido, vale a dire delle quantità di sedimenti che arrivano mediamente ogni anno al mare.

La stazione di misura è stata collocata sopra uno sbarramento costituito da cinque grandi luci regolate da paratoie, azionate in funzione della portata del fiume in modo da assicurare una quota idrometrica pressoché costante a monte della chiusa.

Il calcolo della portata è, anche in conseguenza della geometria degli organi di regolazione, atta a consentire tanto il deflusso a battente quanto quello a stramazzo, alquanto complesso e mai affrontato organicamente.

Nel presente lavoro, si propone la metodologia di calcolo adottata per la stima della portata attraverso un'elaborazione automatica dei dati.

Area di studio

La chiusa di Volta Scirocco si trova nel basso corso del Reno tra l'abitato di Sant'Alberto (RA) e l'attraversamento della strada statale 309 "Romea", a una distanza originaria di circa 9 km dalla foce.

Questa distanza si è ridotta a poco più di 5 km da quando il fiume (1994) ha sostanzialmente abbandonato, sfondando direttamente verso il mare, un ramo litoraneo che risaliva per qualche chilometro verso nord parallelamente alla linea di costa.

Lo sbarramento è mobile e rende possibile la derivazione per gravità a beneficio di una pluralità di utenze ricadenti sia nell'ambito agricolo (Consorti di bonifica della Romagna occidentale e della Romagna centrale), sia in quello industriale (Polimeri Europa, ex Anic; Cereol; Eridania) e idropotabile (Nuovo Impianto di Potabilizzazione di Ravenna, oggi acquisito da Romagna Acque nella sua nuova veste di società delle fonti).

La sezione può essere considerata la chiusura del bacino del Reno; non vi sono, infatti, altre immissioni o derivazioni nel breve tronco ubicato a valle, che risente fortemente della vicinanza del mare in termini sia di salinità delle acque, sia di maree, e può presentare quote anche inferiori allo zero idrometrico, fino a circa 0,50 m sotto il livello marino.

Il bacino idrografico del Reno ha una superficie di 4.139 km², corrispondente al 18% dell'intera superficie fisica dell'Emilia-Romagna e al 6% di quella del bacino del Po.

La superficie del bacino di pianura è pari a 1.542 km², mentre la porzione montana-collinare si estende nell'Appennino tosco-emiliano-romagnolo su una superficie di 2.597 km².

L'afflusso meteorico sul bacino è, in media, intorno ai 1.000 mm annui.

Descrizione della traversa di Volta Scirocco

La traversa fluviale di Volta Scirocco, realizzata dal Consorzio per il Canale Emiliano-Romagnolo nella seconda metà degli anni '50, è costituita essenzialmente da quattro grandi pile in alveo, che unitamente a due spalle laterali individuano cinque luci di ampiezza 18 metri ciascuna, nelle quali sono alloggiati gli organi di scarico e di regolazione.

Ubicato in corrispondenza di una vecchia ansa o “volta” del Primaro tuttora esistente, in un drizzagno artificiale lungo 800 metri e largo 100, nel quale il fiume è stato inalveato a costruzione ultimata, lo sbarramento sorge sul limite meridionale delle valli di Comacchio in zona di grande bellezza e importanza naturalistica.

Un complesso di 1.400 pali trivellati, spinti alla profondità di 24 metri sotto il livello del mare, sorregge - con una densità di 1 palo ogni 2 m² - la platea generale di base, articolata in elementi giuntati secondo la direzione del fiume con unioni assimilabili a cerniere: una sorta di immenso *puzzle* con estradosso a quota -3,00 m s.l.m., che ha consentito all'opera di reggere egregiamente, nei decenni, alle insidie della subsidenza adattandosi docilmente ai cedimenti differenziali di un terreno di fondazione tra i più difficili ed infidi. Le pile e le spalle, dello spessore di 3 metri e lunghe quanto la platea (28 metri), spiccano da quest'ultima in ragione di circa 10 m, e sostengono gli organi di regolazione e scarico (5 grandi paratoie a settore sormontate da altrettante paratoie a ventola, incernierate sulla generatrice superiore) con i relativi elementi di tenuta e di guida, ed i gargami di panconatura (presenti in 3 ordini).

Dalla sommità delle pile e delle spalle, a quota 6,80 m s.l.m., spiccano ulteriormente verso l'alto - sino a quota 14,65 m s.l.m., i portali di sostegno e guida del carro trasportatore dei panconi (ossia degli elementi metallici per il sezionamento delle cinque luci), che costituiscono il tratto più originale e distintivo dell'opera sotto il profilo estetico. Del resto il progetto della traversa di Volta Scirocco porta anche le firme di Giuseppe Evangelisti, Bruno Poggi e Piero Pozzati, tra i più illustri rappresentanti della scuola idraulica e strutturale dell'Università di Bologna.

Le quote idrometriche a monte dello sbarramento vengono mantenute all'interno di un intervallo molto ristretto, compreso tra 1,70 e 2,00 m s.l.m., che rappresenta il miglior compromesso fra le esigenze derivatorie delle varie utenze e i rischi di permeazioni arginali nel tratto fluviale interessato dal rigurgito. La quota minima a valle minima corrisponde a -0,50 m.s.l.m. e si riscontra quando la portata del fiume è nulla in coincidenza con il valore minimo di bassa marea.

Gli organi preposti alla regolazione dell'invaso creato dallo sbarramento, realizzati in carpenteria metallica, sono costituiti, per ciascuna delle 5 luci di 18 metri, da:

- una grande paratoia a settore, che in posizione di chiusura totale determina un battente di 4,50 m sul fondo (dalla quota di estradosso della platea -3,00 m s.l.m., sino alla quota +1,50 m s.l.m.), mentre in posizione di completo sollevamento lascia completamente libero il deflusso sino alla quota 5,50 m s.l.m. (un abbassamento di 1 metro dell'estradosso della platea, immediatamente a valle, determina un bacino di dissipazione in depressione);
- una paratoia a ventola, incernierata in corrispondenza della generatrice superiore della paratoia a settore, in grado di aumentare l'altezza di ritenuta in ragione di ulteriori 1,50 metri.

Il deflusso dell'acqua può avvenire a battente, quando è sollevata la paratoia inferiore (a settore), oppure per stramazzo, quando è abbassata la paratoia superiore (a ventola). Sopra le paratoie corre una passerella di manovra sulla quale, nei pressi della pila sinistra della seconda luce, è stata collocata la stazione di monitoraggio per il campionamento delle torbide.



Fig. 1 - Immagine della stazione di Volta Scirocco

Stima della portata transitante a Volta Scirocco

Dalle stime di progetto, la traversa è in grado di smaltire per deflusso a battente sotto le paratoie a settore (nel seguito denominate anche, per brevità, “paratoie”, in contrapposizione a “ventole”), con una quota idrometrica a monte di 3 m, una portata di 500 m³/s, corrispondente a 100 m³/s per ogni luce. In occasione di grandi piene le paratoie possono essere sollevate interamente fino a stabilire il libero deflusso.

Trattandosi di una sezione influenzata dalla presenza dello sbarramento, non vi è luogo alla formazione di una scala naturale delle portate, in quanto agli stessi livelli possono corrispondere diversi valori di portata, in dipendenza del grado d’apertura delle paratoie e della posizione delle ventole (fig. 2) che regolano rispettivamente il deflusso a battente (sotto) e a stramazzo (sopra).

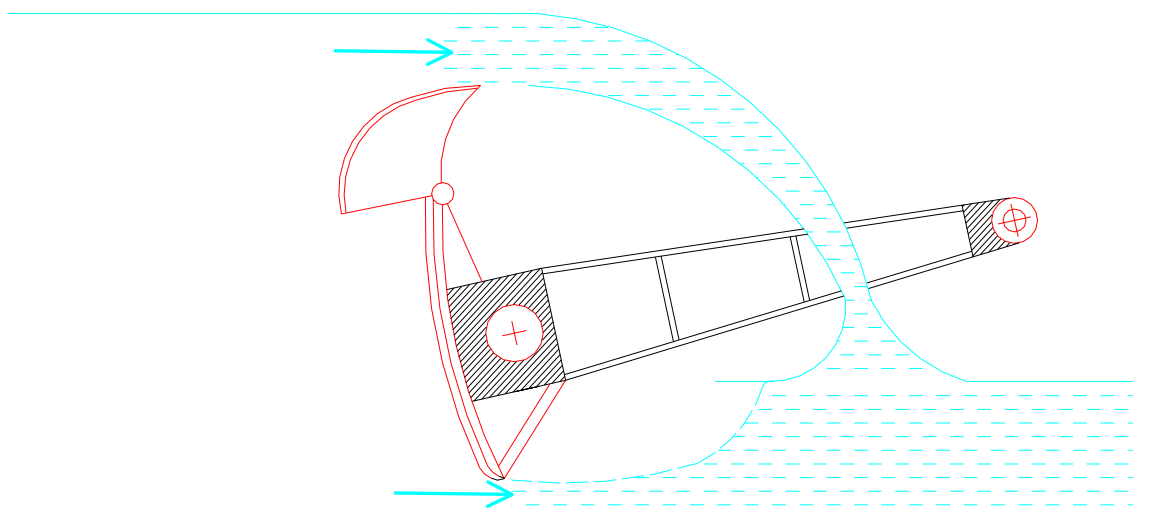


Fig. 2 - Schema del funzionamento della traversa di Volta Scirocco, con rappresentazione schematica delle paratoie a settore e a ventola

Quotidianamente alle ore 8, anche nei giorni festivi, il personale tecnico addetto alla traversa rileva i seguenti dati di funzionamento:

- quote idrometriche a monte e valle (cm s.l.m.);
- apertura delle paratoie (5 valori in cm);
- posizione delle ventole (5 valori in cm).

Le manovre per ottimizzare il livello di monte sono a loro volta oggetto di puntuale registrazione, anche più volte al giorno, in dipendenza delle condizioni idrometriche del fiume. Un esempio di registrazione dei dati di gestione è riportato in fig. 3.

Giorno	Ora	Quota acqua		Posizione paratoie					Posizione ventole					Allarme quota Reno (min - max)	Derivazione industriale	Pompa canaletta irrigua (contaore)	Precipitaz. (in mm.)
		Monte	Valle	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5				
Gio	01-gen-04	01.30	132	+0,41	2	3	2	2	2	0	0	0	0	0	SI		
		08.00	158	+0,62													
		12.00	134	+0,23	2	2	2	2	1								
		18.00	155	+0,26	3	2	2	2	1								
		23.00	136	+0,29	2	2	2	2	1								
Ven	02-gen-04	08.00	167	+0,68	3	3	2	2	1								
		10.00	135	+0,50	3	2	2	2	1								
		11.00	132	+0,42	2	2	2	2	1								
		12.00	137	+0,26	2	1	2	2	1								
		15.00	150	+0,16													
Sab	03-gen-04	01.00	152	+0,30													
		08.00	151	+0,52													
		12.00	142	+0,32	1	1	2	2	1								
		16.00	133	-0,05	1	1	2	1	1								
		04-gen-04	08.00	154	+0,56												
12.00	150	+0,30															
16.30	125	-0,13	1	1	1	1	1										
Lun	05-gen-04	08.00	149	+0,51													
		12.00	144	+0,27													
		18.00	132	-0,15	1	0	0	1	1								

Fig. 3 - Esempio di registrazione dei dati alla sezione di Volta Scirocco

I dati idrometrici e di funzionamento (quote di monte e di valle, numero delle paratoie aperte e relativo grado d'apertura, numero delle ventole in funzione e loro posizione) consentono la stima della portata transitante tramite l'utilizzo delle formule per la portata delle luci a battente rigurgitato e a stramazzo, di seguito riportate:

$$\text{efflusso a battente:} \quad Q_i = \mu \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (1)$$

dove:

μ = coefficiente di efflusso $\approx 0,613$

A = area della sezione della bocca

g = accelerazione di gravità ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Δh = dislivello tra i livelli idrometrici di monte e di valle

$$\text{efflusso a stramazzo:} \quad Q_i = \mu' \cdot b \cdot h \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2)$$

dove:

μ' = coefficiente di efflusso $\approx 0,385$

b = larghezza della lama stramazzone

h = altezza della lama stramazzone

g = accelerazione di gravità ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Entrambe le formule sono in parte viziate dall'incertezza sui valori dei coefficienti di efflusso, che costituiscono l'anello debole della catena soprattutto per le bocche a battente rigurgitate (per le quali sono tollerati valori anche intorno a 0,70, vale a dire oltre il 16% maggiori del valore canonico). Tale incertezza assume maggiore rilevanza in regime di morbida e piena, quando la portata transitante per le paratoie è prevalente su quella sfiorante a stramazzo.

In fig. 4 sono riportati i grafici delle curve di deflusso della sezione, ottenuti con le relazioni sopra riportate, con riferimento ai due casi di deflusso considerati come alternativi fra loro: nella realtà è frequente il deflusso contemporaneo sia a battente sia a stramazzo.

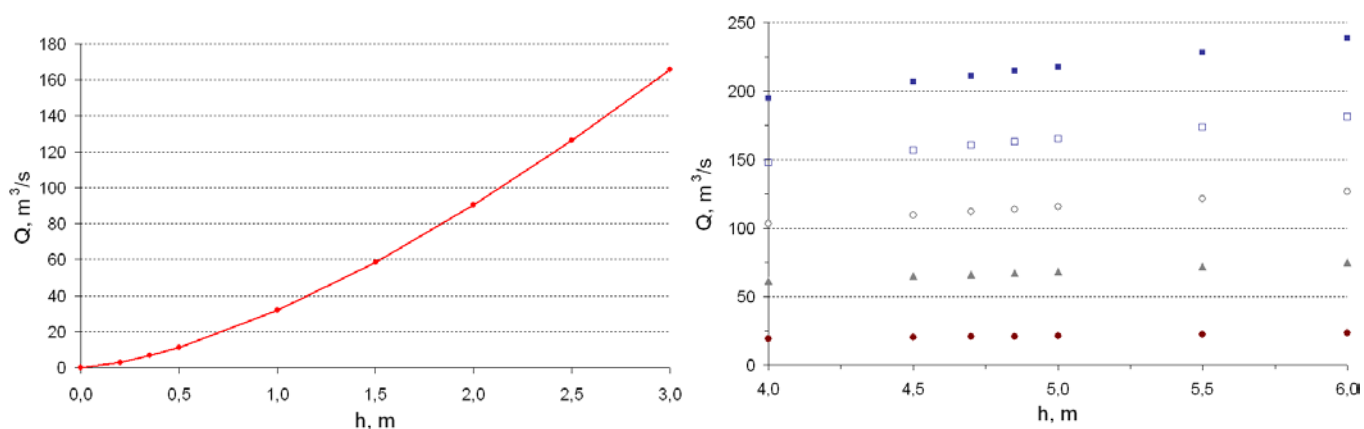


Fig. 4 - Simulazione delle relazioni tra carico idrometrico e portata nei casi di funzionamento a stramazzo (sopra) e a battente (sotto).

Sulla base dei dati di gestione forniti dall'impianto si è stimata, attraverso un programma di calcolo, la portata. Il programma segue il diagramma di flusso riportato in fig. 5.

I dati di gestione, per il periodo 2000-2004, sono stati inseriti nel programma ed elaborati. In tab. 1 si riporta un esempio di tabella di calcolo, dalla quale si ricava, per ogni giorno, il valore di portata parziale, relativo al deflusso a stramazzo e a battente, per ogni paratoia e per ciascuna ventola, ed il valore di portata totale. In fig. 6 si riporta, come esempio, l'idrogramma costruito con i dati elaborati, con distinzione tra deflusso a stramazzo e a battente, ed il valore di portata complessivo, ottenuto dalla somma dei deflussi parziali.

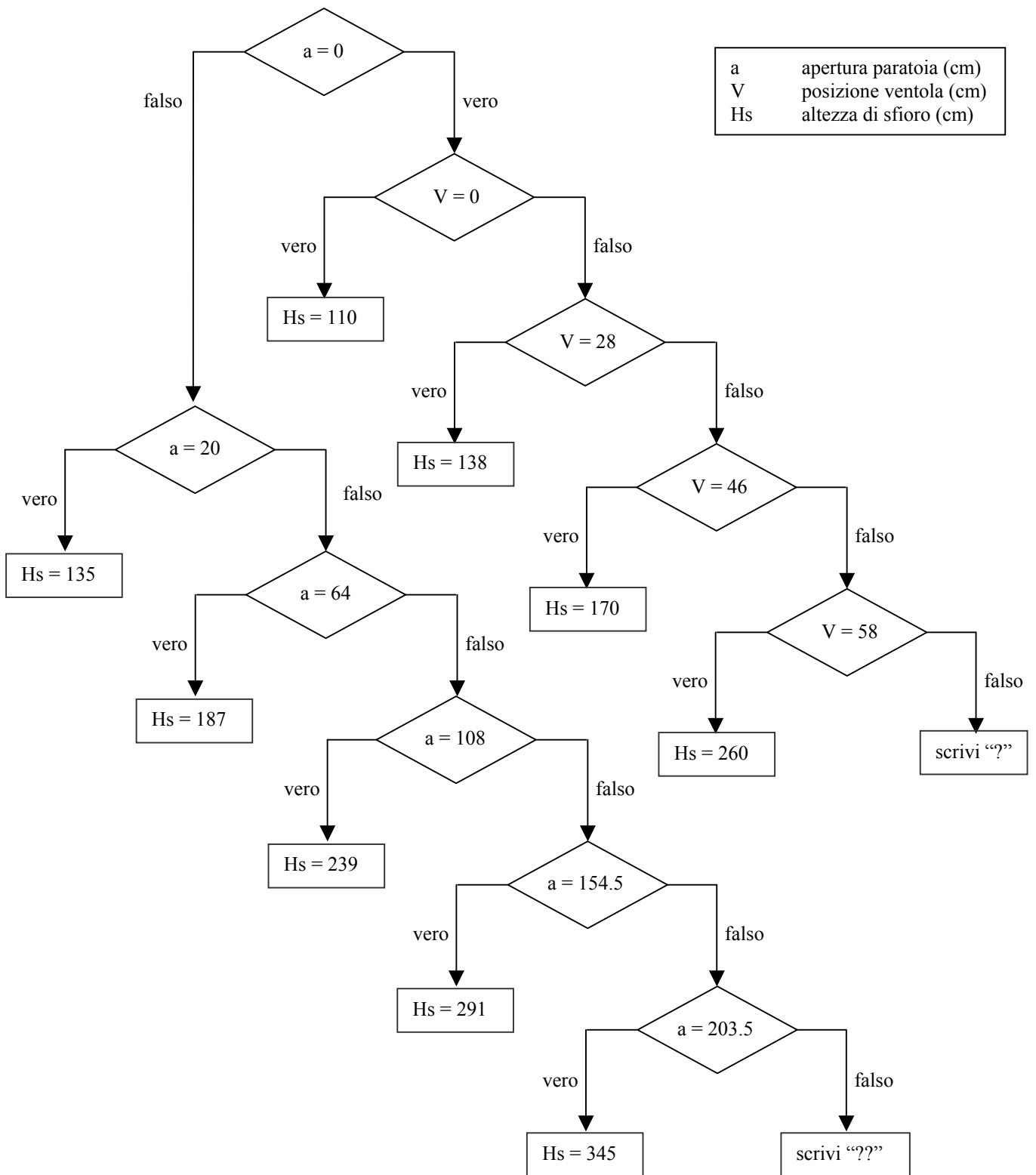


Fig. 5 - Diagramma di flusso per il calcolo della portata alla chiusura di Volta Scirocco

giorno	quote idrometriche (cm s.l.m.)		apertura delle paratoie (cm)					apertura delle ventole (cm)					quota sfioro (cm s.l.m.)					portata da apertura delle paratoie (m ³ /s)					portata da sfioro dalle ventole (m ³ /s)				
	monte	valle	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5	n. 1	n. 2	n. 3	n. 4	n. 5
01/01/04	158	62	64	108	64	64	64	0	0	0	0	0	187	239	187	187	187	30,0	50,6	30,0	30,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
02/01/04	167	68	108	108	64	64	20	0	0	0	0	0	239	239	187	187	135	51,4	51,4	30,5	30,5	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	5,8
03/01/04	151	52	64	20	64	64	20	0	0	0	0	0	187	135	187	187	135	30,5	9,5	30,5	30,5	9,5	0,0	2,0	0,0	0,0	2,0
04/01/04	154	56	20	20	64	20	20	0	0	0	0	0	135	135	187	135	135	9,5	9,5	30,3	9,5	9,5	2,6	2,6	0,0	2,6	2,6
05/01/04	149	51	20	20	20	20	20	0	0	0	0	0	135	135	135	135	135	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
06/01/04	145	35	20	0	0	20	0	0	0	0	0	0	135	110	110	135	110	10,0	0,0	0,0	10,0	0,0	1,0	6,6	6,6	1,0	6,6
07/01/04	152	42	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	135	110	110	110	110	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	8,7	8,7	8,7	8,7
08/01/04	145	36	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	135	110	110	110	110	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	6,6	6,6	6,6	6,6
09/01/04	149	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	110	110	110	110	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
10/01/04	144	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	110	110	110	110	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
11/01/04	141	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	110	110	110	110	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
12/01/04	137	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	110	110	110	110	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
13/01/04	137	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	110	110	110	110	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
14/01/04	137	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	110	110	110	110	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Tab 1 - Tabella di calcolo della portata secondo il programma

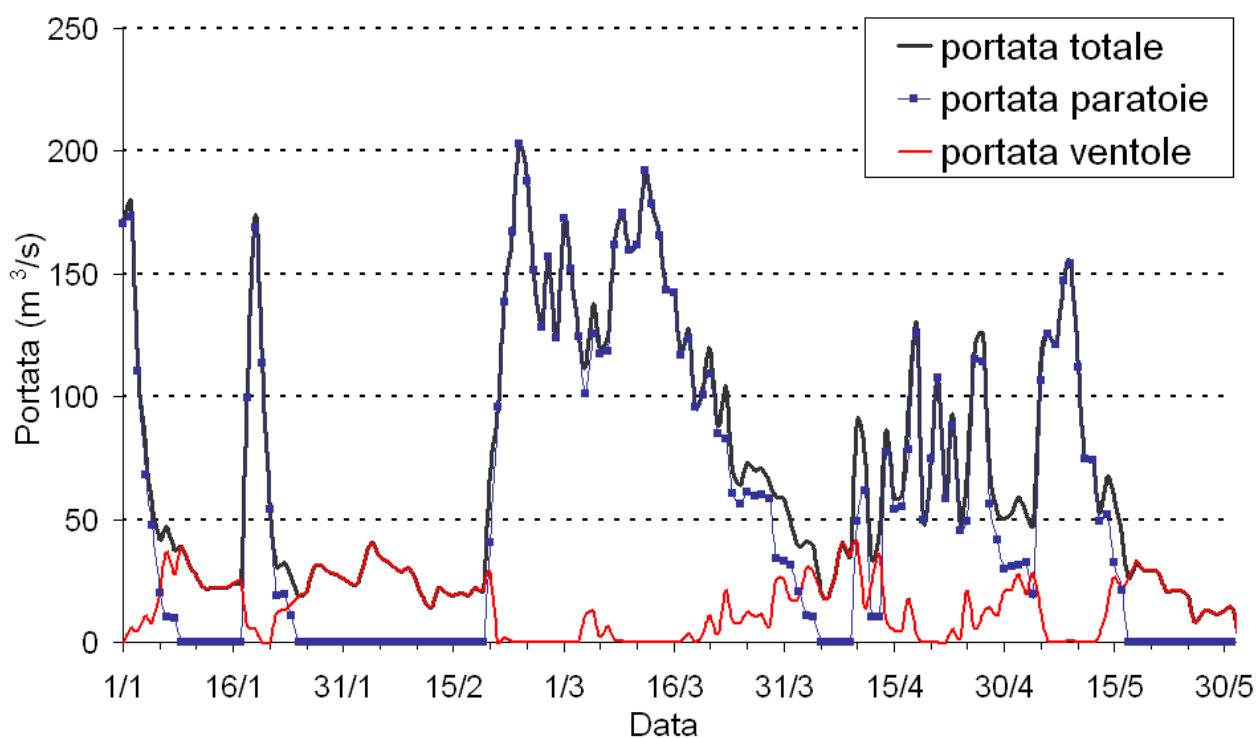


Fig. 6 - Esempio di idrogramma relativo al 1° semestre 2004 con i differenti contributi di portata dovuti alle paratoie e alle ventole e con il deflusso totale

Commento ai risultati

Per un controllo dell'attendibilità dei risultati forniti dal programma di calcolo, si è proceduto ad uno studio alternativo per determinare le portate del Reno e degli affluenti in varie sezioni del bacino. In mancanza di valori sperimentali diretti, la letteratura tecnica offre soltanto i dati degli Annali idrologici dell'Ufficio idrografico di Bologna, benché incompleti e lacunosi. In tale ambito, l'unica serie di dati sufficientemente omogenea e significativa è quella del periodo 1951 – 1979. Ai valori di portata misurati e pubblicati sono stati aggiunti altri valori “ricostruiti” utilizzando i dati di afflusso meteorico e i coefficienti di deflusso ricavati per similitudine da valori coevi di bacini adiacenti ed affini.

La portata media annuale stimata tramite il programma di calcolo per gli anni 2000-2003 risulta pari a 35,1 m³/s. Il valore non differisce significativamente da quello corrispondente desunto dalla letteratura per il periodo 1951-1979, pari a 39,5 m³/s.

In fig. 7 si riportano i valori di portata medi mensili misurati e ricostruiti per la sezione di Bastia, riportati dagli Annali (anni 1951-1979), con la corrispondente fascia di confidenza al 95%, e la portata media calcolata per Volta Scirocco, per il periodo 2000-2004. Si osserva che l'andamento della portata di Volta Scirocco rientra quasi sempre entro la fascia di confidenza al 95%, del trentennio considerato, con differenze dovute alle precipitazioni eccezionali dei mesi di ottobre-novembre 2000, viceversa scarse precipitazioni del febbraio 2000.

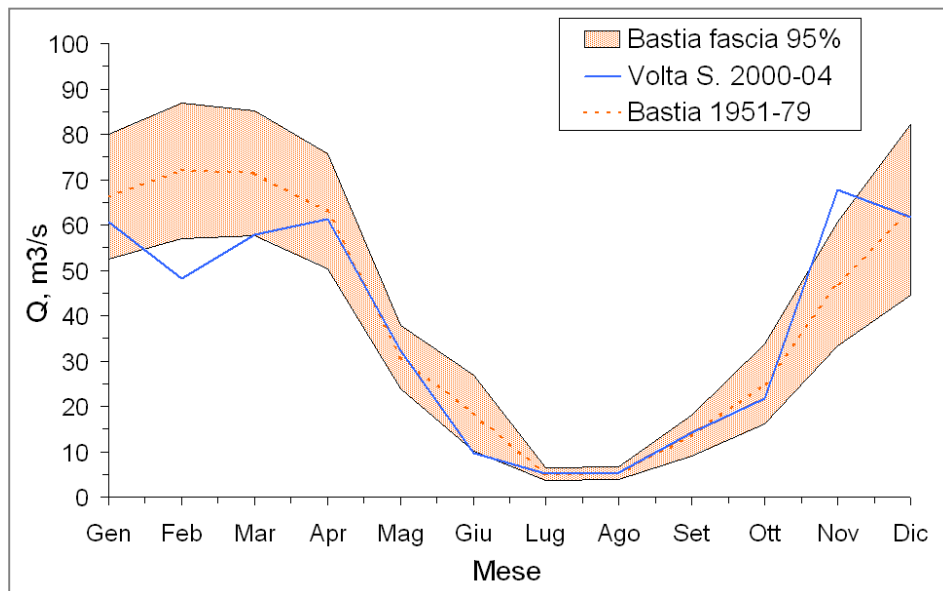


Fig. 7. Andamento medio delle portate a Bastia (stimate/misurate) per gli anni 1951-1979 con relativa fascia di confidenza al 95% e andamento medio delle portate a Volta Scirocco (calcolate) per gli anni 2000-2004.

In tab 2 si riportano le portate medie mensili relative al trentennio di dati pubblicati sugli annali per Bastia (1951-1979), i valori da noi calcolati per Volta Scirocco per il periodo 2000-2004, sulla base

delle manovre e dei livelli idrometrici, ed i dati misurati alla sezione di Bastia dal SIM ARPA e non ancora pubblicati, per il periodo 1997-2002.

Origine dati	Valori medi													
	Anno	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Anno
Programma di calcolo	2000	32,7	21,2	22,0	63,6	12,9	8,3	3,7	5,5	7,1	17,3	102,0	55,8	29,3
	2001	81,1	64,3	79,3	82,5	39,3	11,3	6,2	4,0	8,8	9,8	17,2	11,3	34,6
	2002	19,0	50,1	18,0	37,4	39,8	13,0	9,9	10,5	35,1	50,1	67,0	118,0	39,0
	2003	116,1	39,5	50,1	59,7	15,5	5,6	1,1	1,5	5,4	9,9	84,5	61,5	37,5
	2004	54,3	65,5	119,8	63,6	53,5								71,4
Annali e dati ricostruiti	1951	129,4	200,2	154,7	71,6	47,9	12,9	2,4	12,8	14,7	53,8	95,9	36,7	69,4
	1952	43,1	91,8	42,1	10,9	19,5	2,5	2,1	3,3	10,8	50,8	60	124,1	38,4
	1953	68,4	64,1	36,4	45,9	26,5	42,1	13,7	2,1	5,9	42,4	31,4	16,3	32,9
	1954	39,0	61,6	86,5	36,9	69,9	26,0	4,8	2,5	4,2	1,9	3,9	22,3	30,0
	1955	29,9	68,2	123,4	20,6	1,2	0,9	2,8	14,6	13,4	18,2	61,7	58,0	34,4
	1956	51,50	24,50	83,00	62,40	59,20	20,40	4,37	1,70	8,10	5,44	2,22	2,52	27,1
	1957	38,70	85,00	35,40	89,80	69,00	39,90	2,50	0,85	8,33	5,62	6,34	19,20	33,4
	1958	29,20	21,40	32,50	115,00	18,30	3,86	1,14	0,30	2,80	3,51	29,40	97,80	29,6
	1959	29,50	32,20	51,90	72,00	40,00	15,90	1,47	4,37	23,40	18,70	92,10	232,00	51,1
	1960	92,40	161,00	122,00	123,00	65,20	12,90	15,40	4,43	9,37	65,60	62,80	105,00	69,9
	1961	137,00	33,60	11,20	51,80	16,60	7,46	0,03	3,68	2,77	9,23	66,60	56,60	33,0
	1962	62,50	20,20	84,50	82,70	11,90	4,13	0,62	0,51	2,81	5,06	45,30	32,00	29,4
	1963	81,30	79,60	52,60	55,40	32,20	40,70	6,90	3,89	27,70	18,40	49,90	38,00	40,5
	1964	31,70	51,40	153,00	95,70	9,31	6,50	8,90	5,38	4,62	103,00	41,60	80,10	49,3
	1965	99,60	42,20	84,30	116,00	33,90	105,00	10,80	5,43	21,90	18,80	59,60	57,50	54,6
	1966	39,90	60,10	37,20	29,50	14,80	7,68	2,49	8,81	13,70	33,30	180,00	186,00	51,1
	1967	40,90	38,00	34,00	17,80	9,72	15,60	2,17	4,35	7,02	6,67	27,50	41,00	20,4
	1968	42,00	112,00	32,80	13,50	37,20	75,30	10,70	8,74	8,16	8,71	57,10	84,50	40,9
	1969	80,20	111,00	134,00	107,00	25,40	6,96	4,35	5,25	8,05	7,02	18,00	18,00	43,8
	1970	94,70	45,70	82,40	35,50	24,10	17,80	3,57	3,34	6,73	5,26	6,63	20,20	28,8
1971	84,50	52,20	65,70	56,00	11,00	7,49	3,24	1,59	3,79	4,76	12,60	25,20	27,3	
1972	51,90	126,00	95,50	112,00	53,40	8,52	3,97	6,70	51,60	25,80	38,70	87,30	55,1	
1973	138,00	71,50	66,00	52,40	15,40	8,85	3,97	4,75	47,40	68,90	33,80	33,20	45,3	
1974	46,60	65,40	58,40	23,90	48,80	7,56	4,82	5,15	11,00	22,70	26,50	9,93	27,6	
1975	8,96	36,50	31,20	51,10	17,00	8,68	5,11	8,13	11,40	27,70	45,70	71,80	26,9	
1976	15,80	86,90	68,30	24,10	18,10	4,86	5,08	9,93	33,60	38,90	87,30	99,10	41,0	
1977	110,00	85,40	49,00	61,40	22,00	6,50	6,35	12,30	14,20	12,20	21,20	64,30	38,7	
1978	71,24	69,17	78,80	112,14	47,28	17,15	10,37	4,64	3,98	12,44	11,75	75,79	42,9	
1979	134,0	89,7	81,6	81,6	31,0	2,6	1,8	3,2	10,9	26,7	89,5	41,6	49,5	
BASTIA - dati S.I.M.	1997	98,5	18,8	14,8	13,9	10,3	10,5	5,0	4,8	3,0	3,7	14,4		18,0
	1998	27,6	7,4	8,8	34,1	13,6	4,2	5,3	4,1	6,6	20,1	14,8	9,8	13,0
	1999	23,6	27,3	24,9	30,6	9,0	6,3	5,5	5,5	4,8	16,2	84,0	70,7	25,7
	2000	14,4	7,3	16,1	26,9	4,5	6,1	5,4	5,8	5,3	5,8	81,3	34,0	17,7
	2001	54,5	34,7	56,5	54,2	16,4	6,6	5,3	5,4	5,0	4,6	5,5	2,7	21,0
	2002	4,8	13,2	4,7	20,2	24,5	6,4	6,0	7,0	20,5	29,9	42,1	73,3	21,1

Tab. 2. Valori di portata medi mensili relativi alla sezione di Bastia del SIM ARPA (anni 1997-2002) e del S.I.M.N. (anni 1951-1979; in corsivo i dati ricostruiti). Valori di portata medi mensili relativi alla sezione di Volta Scirocco stimati tramite il programma di calcolo (anni 2000-2004).

In fig. 8 sono messi a confronto i dati giornalieri di portata, misurati alla sezione di Bastia dal SIM ARPA relativi agli anni 2000, 2001 e 2003 con i dati calcolati, per lo stesso periodo, alla stazione di Volta Scirocco, attraverso il programma.

Si osserva che la portata di Volta Scirocco è costantemente maggiore di quella misurata a Bastia, fatto spiegabile con gli apporti dovuti al Santerno e al Senio che si immettono nel Reno tra le due sezioni; inoltre i dati relativi alla sezione di Volta Scirocco talvolta presentano dei picchi dovuti probabilmente alle azioni di manovra che distinguono il deflusso attraverso questa sezione dal naturale deflusso che il fiume ha alla sezione di Bastia.

Per le due serie temporali sono stati calcolati gli indici di efficienza (Nash & Sutcliff, 1970) secondo la (3):

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2 - \sum_{i=1}^n (p_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (3)$$

dove:

m_i = misura al tempo i-esimo

\bar{m} = media dei valori misurati

p_i = scarto tra il valore misurato e il valore calcolato al tempo i-esimo

n = numero di misure

La performance migliore risulta essere relativa all'anno 2000 (E= 72%), tuttavia anche l'efficienza per l'intera serie temporale 2000-2002 è abbastanza soddisfacente (E=58%), tenuto conto della presenza delle immissioni, tra le due sezioni, dei Torrenti Santerno e Senio.

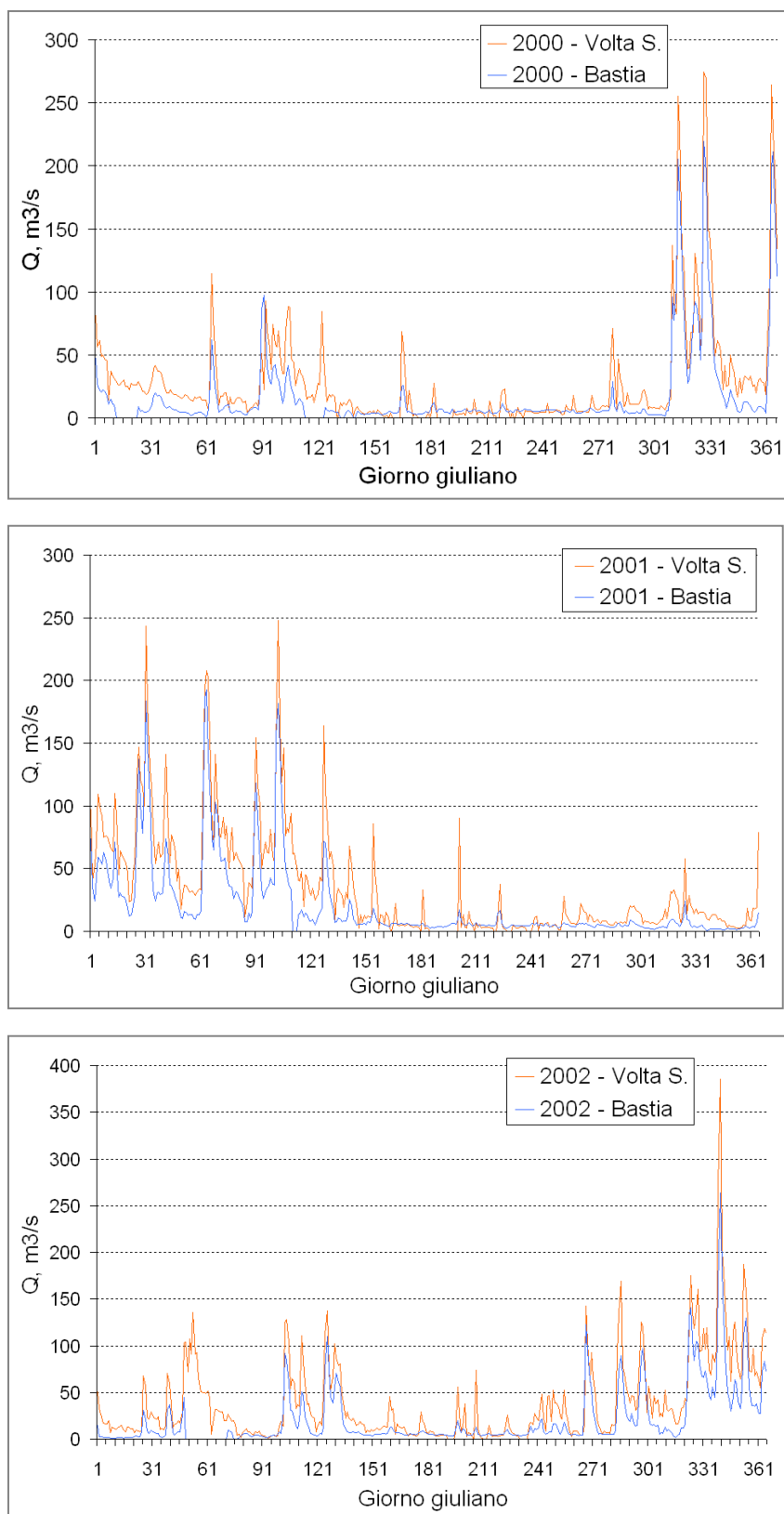


Fig. 8. Confronto tra gli andamenti giornalieri del deflusso alla sezione di Bastia (dati misurati dal SIM – ARPA) e di Volta Scirocco (dati calcolati col programma) per gli anni 2000-2002.

Prospettive

Una seconda causa di incertezza nella stima della portata, oltre al valore dei coefficienti nelle formule classiche della foronomia, risiede nella lunga periodicità delle rilevazioni idrometriche (1 sola misura giornaliera garantita) in rapporto alla variabilità del fenomeno e alla frequenza delle operazioni di regolazione.

In future elaborazioni, si potranno anche utilizzare i dati di altezza idrometrica trasmessi via radio alla sede del Consorzio ogni 30 minuti. La disponibilità di tali dati consente di avere 48 misurazioni giornaliere per la stima della portata del fiume.

Sul versante dell'accuratezza assoluta, la disponibilità di misure di portata dirette, preferibilmente provenienti da sezioni prossime e meno affette da perturbazioni del moto, come ad esempio uno dei ponti ubicati a monte dello sbarramento, potrebbe permettere la taratura del programma attraverso una migliore definizione dei coefficienti delle formule idrauliche adottate.

Bibliografia

Nash L.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models - Part 1: A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.