

S. MONTI (*), F. RAPETTI (**)

STIMA DEL TRASPORTO POTENZIALE SUL FONDO DEL FIUME ARNO (TOSCANA) TRA IL 1951 E IL 2010

Riassunto - Dopo alcune note generali sul bacino idrografico del F. Arno si delinea il clima dell'unità fisiografica ed il clima meteomarinico presso la foce del fiume. Si discute della disponibilità di inerti nell'alveo del corso d'acqua, considerando che, dalle stime effettuate dal Genio Civile di Pisa dal 1950 al 1970, nei tratti di asta fluviale compresi tra la confluenza del Rio Arnino (S. Miniato) e Pisa, e da S. Giovanni alla Vena alla foce, i prelievi di inerti sarebbero ammontati a oltre due milioni di metri cubi. La stima del trasporto solido sul fondo viene sviluppata con la relazione di Schoklitsch (1930), peraltro già utilizzata da Ruggiero nel 1948 in uno studio del Comune di Pisa riguardante le possibilità di ripascimento del litorale pisano. I dati idrologici utilizzati nella ricerca, consistenti nei valori delle portate medie giornaliere, si riferiscono alla stazione di chiusura del bacino del F. Arno a S. Giovanni alla Vena. La stima del volume medio potenziale di sabbia trasportata nel periodo 1951-2010 è di 45.097 m³/anno, con valori minimi e massimi di 4.806 m³ (2007) e 153.289 m³ (1960). Dopo un periodo di intenso trasporto di sabbie, concentrato negli anni Cinquanta e Sessanta del XX secolo, il fiume ha diminuito considerevolmente il trasporto potenziale per un lungo periodo, con volumi compresi tra 30.000 e 40.000 m³/anno. Negli ultimi anni si osserva una ripresa del trasporto potenziale, con un picco di 135.446 m³ nel 2010, che rappresenta il valore massimo secondario della serie, e di 69.681 e 79.336 m³ nel 2004 e nel 2005. Tali fluttuazioni dimostrano che il F. Arno, in presenza di eventi pluviometrici prolungati ed estesi, nonostante le modificazioni che hanno riguardato l'assetto ambientale e antropico del bacino, conserva la capacità di sviluppare portate liquide elevate e rilevanti trasporti potenziali di sabbie sul fondo.

Parole chiave - Trasporto solido sul fondo, Fiume Arno, Toscana.

Abstract - *Estimate of potential bed load transport in River Arno (Toscana) between 1951 and 2010.* After some general remarks about the River Arno hydrographic basin, the climate of the physiographic unit and the meteomarine climate at the river mouth are outlined. The availability of inert materials in the river bed is also discussed. According to evaluations provided by the Department of Civil Engineering of Pisa between 1950 and 1970, inert dredgings would have amounted to over two million cubic meters in the sectors from the confluence of Rio Arnino at San Miniato to Pisa and from S. Giovanni alla Vena to the mouth.

Bed load sediment transport estimates are reckoned after the Schoklitsch formula (1930), already used by Ruggiero in 1948 in a study of the Municipality of Pisa concerning the chance of artificial nourishment of the Pisa coast. Hydrological data used in this paper, such as mean daily discharge, are related to the closure station of Arno basin at S. Giovanni alla Vena. Average potential volumes of sand transported on the river

bed in 1951-2010 span of time are estimated in 45,097 m³/year, with minimum and maximum value of 4,806 m³ (2007) and 153,289 m³ (1960) respectively. After a period of intense sand transport, focussed in the Fifties and Sixties of the XX century, the river has considerably decreased its sediment transport over a long period, with estimated volumes in 30,000-40,000 m³/year. In recent years, the potential transport increased, with a peak of 135,446 m³ in 2010, that represents a secondary maximum, and values of 69,681 m³ and 79,336 m³ in 2004 and in 2005. This trend proves that River Arno, in presence of longlasting and widespread rainfall events, maintains the capacity to develop high water discharges as well as a significant potential bed load sand transport, despite changes in environmental and anthropic planning.

Key words - Bed load transport, River Arno, Tuscany.

PREMESSA

Lo studio si propone di valutare il trasporto solido sul fondo del F. Arno presso la foce, per i risvolti che riguardano lo storico insabbiamento del delta ed il rifornimento di sabbia del litorale pisano, che dalla seconda metà dell'Ottocento ha subito fasi di forte erosione (Toniolo, 1927; Rapetti & Vittorini, 1974; Noli & Franco, 1989; Bini *et al.*, 2008).

La sostanziale impossibilità pratica di eseguire misure dirette del trasporto fluviale sul fondo impone di ricorrere a stime basate su modelli idraulici e a formule empiriche, idonee a stabilire relazioni significative tra i parametri che concorrono a determinare la dinamica del fenomeno. In questo studio si utilizza la formula di Schoklitsch (1930), già applicata al tratto prefociale del F. Arno nell'ambito di uno studio del Comune di Pisa dal titolo «Le possibilità di ripascimento del litorale di Marina di Pisa» (1948). La verifica dei parametri geometrici, idraulici e sedimentologici assunti in quella ricerca costituisce la condizione per l'applicabilità del procedimento di calcolo all'ultimo sessantennio. Mentre paiono costanti nel tempo i dati granulometrici, più incerta è invece la ricostruzione della dinamica dei profili longitudinali e trasversali del fiume dal 1947 (anno di riferimento dello studio del Comune di Pisa) al 2010. Il primo profilo longitudinale del fondo del F. Arno risale al 1844. Da quell'anno sono stati eseguiti nuovi rilievi nel 1920, e, successivamente, a cura dell'Ufficio Idrografico, nel 1922, 1936, 1952, 1968, 1970 e 1971. Nel 1844, tra Pisa e la foce, la profondità media del fondo

(*) Via Gardenie 167/H, 55100 Lucca, Italy. E-mail: stef.monti@gmail.com

(**) Università di Pisa, Dipartimento di Scienze della Terra, via S. Maria 53, 56126 Pisa, Italy. E-mail: rapetti@dst.unipi.it

era di 3-4 m s.l.m.m., mentre al 1971 di 4-6 m s.l.m.m. (Cavazza & Panico, 1977). Negli ultimi anni l'Autorità di Bacino del F. Arno ha eseguito nuove livellazioni di precisione delle sezioni trasversali fino al 2002 (www.adbarno.it). L'analisi dei dati evidenzia una notevole variabilità temporale dei profili longitudinali e trasversali ma non delle dimensioni delle sezioni trasversali, che, per le antiche arginature da S. Giovanni alla Vena al mare, sono rimaste sostanzialmente invariate. Questo implica una conseguente modesta incidenza in termini percentuali sulle caratteristiche della sezione bagnata, comunque tale da non inficiare, per i risultati del presente lavoro, la validità delle stesse assunzioni geometriche di Ruggiero.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il bacino idrografico del F. Arno s.s., dall'origine allo sbocco al mare, ha un'area di 8.228,1 km². Le maggiori altitudini si riscontrano nel gruppo montuoso del Falterona e del Pratomagno, dove si raggiungono 1.658 m s.l.m.m. sul Monte Falco e 1.537 m s.l.m.m. sul Poggio Uomo di Sasso; la quota media del bacino è stimata in 353 m s.l.m.m. (Fig. 1).

L'analisi delle frequenze delle fasce altimetriche mostra che oltre la metà dell'unità fisiografica ha una morfologia di pianura e di bassa collina, circa il 30% è compresa tra la collina e la bassa montagna; le aree di montagna coprono il 14,3% della superficie (Natoni, 1944) (Tab. 1).

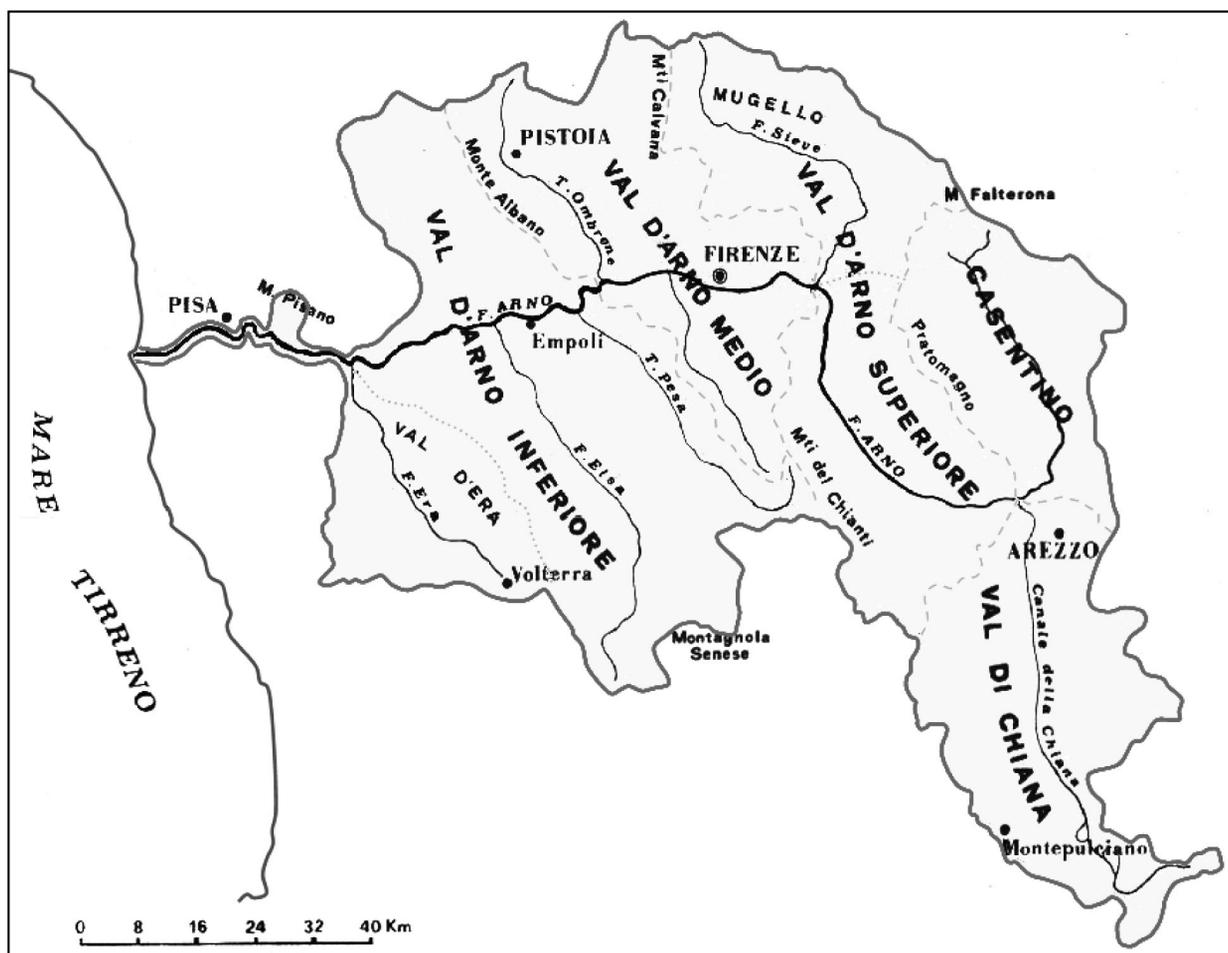


Fig. 1 - Bacino idrografico del F. Arno (Rapetti, 1971).

Tab. 1 - Distribuzione delle aree del bacino del F. Arno per fasce altimetriche [m s.l.m.m.], dall'origine allo sbocco al mare (da Natoni, 1944).

Estensioni	0-300	300-600	600-900	900-1200	1200-1500	1500-1677
Area [km ²]	4.550,2	2.502,5	805,6	298,2	68,7	2,9
Percentuale [%]	55,30	30,41	9,79	3,62	0,83	0,05

NATURA FISICA DEI TERRENI

Il bacino del F. Arno presenta una notevole complessità strutturale, che non può essere descritta in questa sede, se non in estrema sintesi. L'Appennino settentrionale, che costituisce per lunghi tratti lo spartiacque settentrionale dell'unità fisiografica, ha una struttura a falde, che si sono formate durante la fase del corrugamento terziario (Boccaletti *et al.*, 1971; Alvarez *et al.*, 1974; Kligfield, 1979). Nel lato tirrenico della struttura, tra il Miocene superiore e il Quaternario, si sono determinati movimenti distensivi che hanno prodotto faglie dirette ad alto angolo, con la formazione di pilastri e fosse tettoniche: nel corso dell'evoluzione del reticolo idrografico dell'Appennino settentrionale tali strutture hanno dato forma ai bacini intermontani del Casentino e del Mugello (Mazzanti & Trevisan, 1978).

Più pertinente, ai fini dell'indagine, è il raggruppamento in classi litologiche relativamente omogenee: si osserva la netta prevalenza di formazioni arenacee e argillose, appartenenti a classi di rocce incoerenti, semicoerenti e pseudocoerenti, tutte con un'alta suscettività all'erosione (Tab. 2).

INQUADRAMENTO CLIMATICO

Il clima del bacino del F. Arno è determinato dalla sua posizione rispetto alle direzioni di moto dei flussi perturbati occidentali, dalla distanza dal Golfo di Genova, sede di basse pressioni dinamiche sottovento alle Alpi, e da fattori geografici, quali la distanza dal mare, l'altitudine, l'orientamento e la distribuzione dei rilievi. La combinazione di tali fattori, in un contesto morfologico molto articolato, determina una marcata differenziazione di climi. Nel Valdarno medio e inferiore il corso del F. Arno costituisce una significativa demarcazione naturale tra le aree a Nord del fiume, più fresche e piovose, e quelle a Sud, più calde e aride.

La distribuzione della temperatura dell'aria mostra valori annui compresi tra 7-9 °C nel Pratomagno e nelle parti più elevate dell'Appennino e 15-16 °C nel bacino intermontano di Firenze, come in alcuni bacini idrografici di sinistra del F. Arno e nella fascia costiera confinante alla foce del fiume.

Gli afflussi idrometeorici annui più elevati, oltre i 1.500 mm, si verificano nei crinali dell'Appennino

pistoiese, nel Pratomagno, nell'Alpe di S. Benedetto e nell'Alpe di Serra (alto Casentino); nella prominenza meridionale del bacino (Val di Chiana) e nelle parti vallive dei sottobacini di sinistra del F. Arno, dal F. Pesa fino al F. Era, sono compresi tra 800 e 900 mm. Negli ultimi sessanta anni le precipitazioni medie annue ragguagliate sono state di 968,2 mm ed hanno presentato un campo di variazione compreso tra 669,6 mm (1985) e 1.477,6 mm (1960) (Ministero LL. PP.).

L'intensità pluviometrica supera 100 mm/giorno in gran parte del bacino, con punte di 180-200 mm in alcuni settori dell'Appennino. A Serra Pistoiese (850 m s.l.m.m.), nell'Alta Valdinievole, dove si raggiungono intensità molto elevate, le «linee segnalatrici di probabilità pluviometrica» indicano, ad esempio, in un *tempo di ritorno* di cento anni, i valori della Tabella 3:

Il numero annuo di giorni con pioggia raggiunge i valori più elevati nell'Appennino e nel Pratomagno (Camaldoli: 136 giorni); nella parte centrale del bacino i valori sono compresi tra 90 e 105 giorni; nella fascia costiera si registrano meno di 85 giorni. I periodi più lunghi di siccità meteorologica sono compresi tra 50 e 60 giorni/anno, con i valori più bassi sui rilievi e più elevati nelle aree prossime alla foce (Rapetti, Vittorini, 1996).

CLIMA METEOMARINO

Lungo la costa pisana i venti presentano una marcata asimmetria stagionale, con la netta prevalenza dei venti da levante nel semestre invernale e dei venti da ponente nel semestre estivo. I venti più intensi provengono dal III quadrante, dove si distinguono l'WSW e il SW (Libeccio) (Rapetti & Vittorini, 1978).

Lo stato medio del mare nel settore di traversia della foce del F. Arno è caratterizzato dalla netta prevalenza ed intensità del moto ondoso proveniente da SW e da WSW; alle altre direzioni spettano frequenze ed intensità più basse, come per l'ondazione da Maestrale: l'energia dell'ondazione da Libeccio è infatti stimata dieci volte più elevata di quella da Maestrale (Rapetti & Vittorini, 1984). Secondo Noli & Franco (1989) la risultante energetica dell'ondazione, ottenuta per somma vettoriale dei valori relativi alle diverse direzioni del settore di traversia, è di 247 gradi.

L'idrodinamica dell'ambiente marino determina la direzione della corrente litoranea (*long-shore current*)

Tab. 2 - Distribuzione assoluta e percentuale delle classi litologiche presenti nel bacino del F. Arno (da Natoni, 1944).

Sciolti siliceo		Argilloso con scheletro		Argilloso compatto		Sabbioso o ghiaioso		Alluvionale		Torboso		Totale	
km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	Km ²	%	km ²	%	km ²	%
2.812,6	34,2	1.565,8	19,0	517,3	6,3	2.066,5	25,1	1.248,5	15,2	17,4	0,2	8.228,1	100,00

Tab. 3 - Altezze di precipitazione [mm] attese in un *tempo di ritorno* di 100 anni a Serra Pistoiese (Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa).

Serra Pistoiese	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	30 min.	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
		25,5	32,4	37,3	41,2	47,5	60,0	93,5	123,8	163,8

prevalentemente verso Nord, con il trasporto delle sabbie del F. Arno verso le foci del F. Morto Nuovo e del F. Serchio. Nel semestre estivo, quando l'ondazione da Maestrale è più attiva, possono verificarsi significativi spostamenti di sabbia da Nord a Sud, ma il bilancio netto del trasporto litoraneo è tuttavia nettamente orientato verso Nord.

BILANCIO IDRICO-CLIMATICO

L'equazione del bilancio idrico-climatico (Thornthwaite, Mather, 1957) nei bacini idrografici è esprimibile con la relazione:

$$P = AE + S \pm \Delta ST$$

P: piogge; AE: evapotraspirazione reale; S: surplus; ΔST : variazione della riserva idrica del suolo.

Nel bacino del F. Arno l'evapotraspirazione potenziale annua (EP) presenta valori compresi tra 500-600 mm sui rilievi maggiori (Camaldoli, 1.111 m s.l.m.m.) e superiore a 800 mm nelle aree pianiziali (Pisa, 6 m s.l.m.m.); l'evapotraspirazione reale è prossima a quella potenziale alle quote più elevate, come a Camaldoli, mentre lo scarto percentuale più significativo tra i due parametri riguarda le aree pianiziali. Il deficit idrico annuo (D) è prossimo a zero sull'Appennino, mentre si avvicina ai 200 mm nel bacino intermontano di Firenze; il surplus idrico annuo (S) può superare 1.000 mm sui

rilievi maggiori e scendere a valori inferiori a 600 mm in alcune aree di pianura. L'indice di umidità globale (I_m) è compreso tra la classe A (*clima perumido*), presente nell'alto Appennino, e la classe C_1 (*clima subarido*), che si sviluppa in vaste aree a Sud del F. Arno, con ampia diffusione del tipo *subumido* (C_2) (Tab. 4).

AFFLUSSI RAGGUAGLIATI E DEFLUSSI LIQUIDI

Il regime mensile e stagionale degli afflussi nel bacino del F. Arno è sotto l'influenza della migrazione stagionale del piano del fronte polare: nel semestre freddo prevalgono le basse pressioni atmosferiche associate ai sistemi frontali atlantici; in estate la vasta area di alta pressione che si instaura nel Mediterraneo occidentale determina tempo soleggiato e asciutto. Ne consegue un massimo pluviometrico in autunno o in inverno, seguiti dalla primavera e dall'estate (Tab. 5).

I deflussi del F. Arno seguono l'andamento degli afflussi ragguagliati con uno sfasamento di circa un mese, poiché i suoli, tra la fine dell'estate e l'inizio dell'autunno, presentano ordinariamente un deficit idrico molto elevato. Le piogge autunnali determinano la loro ricarica, che generalmente si completa all'inizio dell'inverno. Il coefficiente di deflusso ha un valore medio annuo di 0,39, con massimo principale in marzo (0,81) e minimo in agosto (0,08).

Il coefficiente di deflusso del bacino del F. Arno si è sensibilmente ridotto negli ultimi decenni, sia per «cause naturali», riferibili alla diminuzione della piovosità

Tab. 4 - Elementi del bilancio idrico-climatico e piogge efficaci (P_{efficaci}) [mm] in alcune stazioni del bacino del F. Arno nel periodo 1956-1991 (da Rapetti & Vittorini, 1996).

Stazioni	m s.l.m.m.	P	EP	AE	D	S	I_m	Tipi	P_{efficaci}
Camaldoli	1.111	1.662	574	562	7	1.095	190	A	1.100
Arezzo	277	848	802	626	149	196	6	C_1	222
Pistoia	88	1.306	790	671	119	635	65	B_3	635
Firenze Ximen.	79	790	804	608	192	186	-1	C_1	182
S. Miniato	137	895	818	629	189	266	9	C_2	266
Pisa	6	902	806	628	178	274	12	C_2	96

Tab. 5 - Campo di variazione e valori medi degli afflussi ragguagliati [mm], dei deflussi [mm] e del coefficiente di deflusso nel bacino del F. Arno (1951-1997).

		G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
Afflussi	min	4,1	2,5	1,9	9,1	4,3	8,4	4,1	3,2	3,8	9,0	4,7	12,6	-
	max	182,1	236,5	164,8	174,3	156,6	113,3	123,3	109,0	214,4	402,6	275,8	237,7	-
	med	81,8	83,3	78,1	83,3	73,4	58,8	36,2	53,9	83,3	110,3	123,0	102,7	968,2
Deflussi	min	4,4	6,1	8,8	12,1	6,0	2,1	1,4	1,4	1,4	1,7	2,8	6,4	-
	max	111,4	150,8	107,9	67,2	81,6	43,3	14,4	7,0	24,1	98,0	125,7	126,8	-
	med	44,7	45,3	41,1	35,3	25,0	13,7	4,9	3,0	6,3	17,4	31,9	43,4	312,1
Coeff. def.	min	0,22	0,14	0,23	0,12	0,14	0,05	0,03	0,02	0,02	0,03	0,06	0,13	-
	max	4,68	4,84	7,42	2,22	4,23	0,54	1,44	0,59	0,53	1,19	2,45	2,14	-
	med	0,72	0,70	0,81	0,51	0,44	0,23	0,20	0,08	0,09	0,15	0,30	0,45	0,39

e all'aumento della temperatura dell'aria (Cortemiglia *et al.*, 2011), sia a causa degli interventi antropici, che hanno modificato l'uso del suolo e aumentato i prelievi idrici dalle falde (Vittorini, 1991).

PORTATE LIQUIDE

Le portate liquide sono state misurate presso la stazione di S. Giovanni alla Vena (Servizio Idrologico Regionale della Toscana), che rappresenta la stazione di chiusura del bacino del F. Arno, poiché a valle il fiume non riceve contributi idrici significativi.

L'andamento interannuale degli afflussi e delle portate liquide mostra il valore massimo principale nel 1960, quando, in seguito ad afflussi di 1.477,6 mm, si è determinata una portata media annua di 173,0 m³/s; il massimo secondario della serie si è verificato nel 2010 con 151,6 m³/s (Fig. 2) (per l'anno 2010 non è stato possibile stabilire il rapporto afflussi/deflussi poiché dal 1998 il Servizio Idrologico Regionale della Toscana non pubblica gli afflussi ragguagliati al bacino). Il valore massimo delle portate medie decennali ha riguardato il periodo 1961-1970 (93,7 m³/s) mentre al decennio successivo spetta il valore minimo (68,2 m³/s) (Tab. 6). Il campo di variazione delle portate medie giornaliere è compreso tra valori inferiori a 5 m³/s (da giugno a novembre) e 1.827,5 m³/s (27 novembre 2005) (Tab. 7) (la portata di piena del 27 novembre 2005 è superiore a quella del 3-4 novembre 1966, durante la grande piena del F. Arno, stimata in 1.500 m³/s (Fig. 3). Le portate dei due eventi non sono tuttavia facilmente confrontabili, poiché nel primo caso consistenti volumi d'acqua furono laminati a monte di S. Giovanni alla Vena attraverso lo Scolmatore del F. Arno, canale

che convoglia la acque da Pontedera a Calambrone; nella piena del 4 novembre 1966 si verificarono invece imponenti esondazioni, soprattutto nel tratto fluviale di Firenze, dove, secondo le stime dell'Autorità di Bacino del Fiume Arno, tracciarono più di 70 milioni di metri cubi di acqua).

PORTATE SOLIDE

Il trasporto fluviale dei materiali solidi risulta dalla somma del trasporto in sospensione, costituito dai sedimenti più fini, e del trasporto delle sabbie sul fondo (Van Rijn, 1984a; Van Rijn, 1984b). Questa distinzione è di particolare interesse, poiché il sedimento trasportato in sospensione, che costituisce la percentuale più elevata dei materiali litoidi convogliati dal fiume, svolge un ruolo secondario sia nei processi di sedimentazione d'alveo sia nel ripascimento naturale della spiaggia, poiché tende a sedimentare in acque calme, in mare aperto. Le torbide tuttavia contengono una frazione di sabbia, la cui percentuale rispetto al totale del materiale trasportato in sospensione dipende dalla portata liquida: dalle misure eseguite da Mancini nel F. Arno, a Firenze (1956), la frazione di sabbia è stata rispettivamente del 4,4% con la portata di 84 m³/s e del 45,3% con la portata di 560 m³/s.

Il deflusso solido annuale avviene per la quasi totalità durante le grandi piene: per il F. Arno, Bendini (1969), stima che i 2/3 del trasporto in sospensione avvenga in 12 giorni.

Portate solide in sospensione

Dalle misure eseguite sui principali bacini idrografici dei fiumi della Toscana è risultata una correlazione

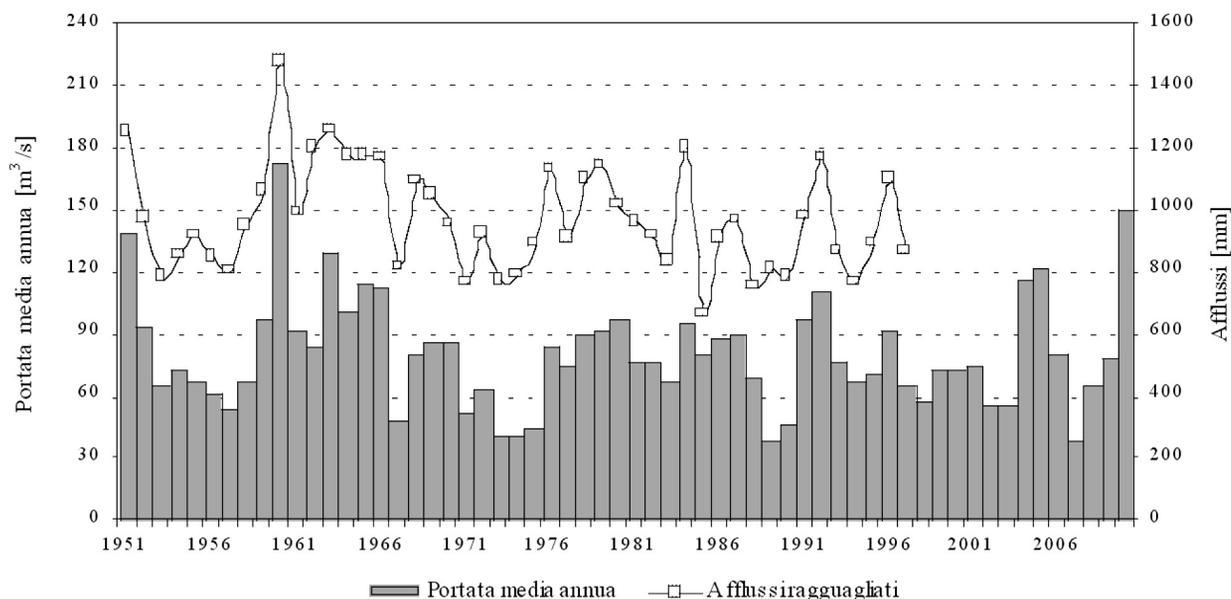


Fig. 2 - Portate medie annue [m³/s] e afflussi ragguagliati [mm] alla stazione di San Giovanni alla Vena (1951-2010).

Tab. 6 - Andamento decennale delle portate medie annue [m³/s] e degli afflussi ragguagliati [mm] nel bacino del F. Arno.

	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010
Portata media [m ³ /s]	89,0	93,7	68,2	73,2	78,8	83,3
Afflusso ragguagliato [mm]	994,7	1.090,8	940,8	906,4	-	-

Tab. 7 - Campo di variazione delle portate medie giornaliere [m³/s] a S. Giovanni alla Vena (1951-2010).

	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Q _{min}	10,8	8,0	7,9	9,0	5,5	3,5	2,9	2,3	1,9	2,1	4,6	6,2
data	08/89	19/89	05/73	30/07	24/07	13/03	23/03	vari	22/03	13/03	01/56	vari
Q _{max}	1.220,0	1.590,0	1.081,3	655,0	1.160,0	479,4	179,0	134,0	433,0	1.260,0	1.827,5	1.587,5
data	01/53	06/51	05/09	12/57	04/54	06/84	07/74	31/66	28/65	31/92	27/05	25/10



Fig. 3 - Piena del F. Arno del 4 novembre 1966 a Firenze (a sinistra) (archivio fotografico dell'Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa) e del 27 novembre 2005 a Pisa (a destra) (foto S. Monti).

altamente significativa tra la torbidità specifica annua, l'estensione percentuale delle superfici erodibili e delle superfici coltivabili e le precipitazioni annue, rappresentata dalla seguente regressione multipla a tre variabili indipendenti (Cavazza, 1984):

$$\text{Log } T_b = 19,0980 + 4,8581 \times \text{Log } T_c - 7,7404 \times \text{Log } T_a - 3,9127 \times \text{Log } P \quad (1)$$

T_b : deflusso torbido specifico medio annuo [$1,0 \times 10^3$ kg/km²/anno]; T_c : percentuale dei terreni erodibili del bacino [%]; T_a : superficie dei terreni coltivabili del bacino [%]; P : precipitazioni annue ragguagliate al bacino idrografico [mm].

L'applicazione della (1) al bacino del F. Arno, ha consentito di stimare un deflusso torbido specifico dell'ordine di $185,4 \times 10^3$ kg/km²/anno (anno medio), al quale corrisponde un deflusso torbido di $1,524 \times 10^9$ kg/anno (Cavazza, 1984).

Le portate torbide del fiume, seppure misurate in modo discontinuo, poiché dal 1936 condotte solo negli intervalli temporali 1936-1942, 1954-1985 e 1995-1999,

dagli anni Settanta mostrano una netta tendenza alla diminuzione. Tra il 1936 e il 1942 il deflusso torbido medio è stato di $2,7 \times 10^9$ kg/anno, mentre nel periodo 1954-1968 di $1,7 \times 10^9$ kg/anno (Ministero LL. PP.). Dopo un periodo di elevate portate torbide, protrattosi fino al 1966 (valore medio annuo di 70-80 kg/s), si è verificata una sensibile diminuzione, seguita da una fase di stabilità, con valori che si sono aggirati intorno ai 30 kg/s per anno (Fig. 4).

Portate solide sul fondo

Il rifornimento di materiali terrigeni in alveo è condizionato dall'entità dei processi erosivi, dalla cattura di sedimenti che si verifica negli invasi artificiali e dall'entità dei prelievi di ghiaia e di sabbia effettuati lungo l'alveo del F. Arno e dei suoi affluenti. Per quest'ultimo aspetto, le stime fornite dall'Ufficio del Genio Civile di Pisa agli inizi degli anni Settanta offrivano il quadro della Tabella 8.

Nel tratto dalla confluenza del Rio Arnino (all'altezza di S. Miniato) a Pisa, per una lunghezza d'asta di circa 55 km, le concessioni per l'estrazione di inerti, dal 1950

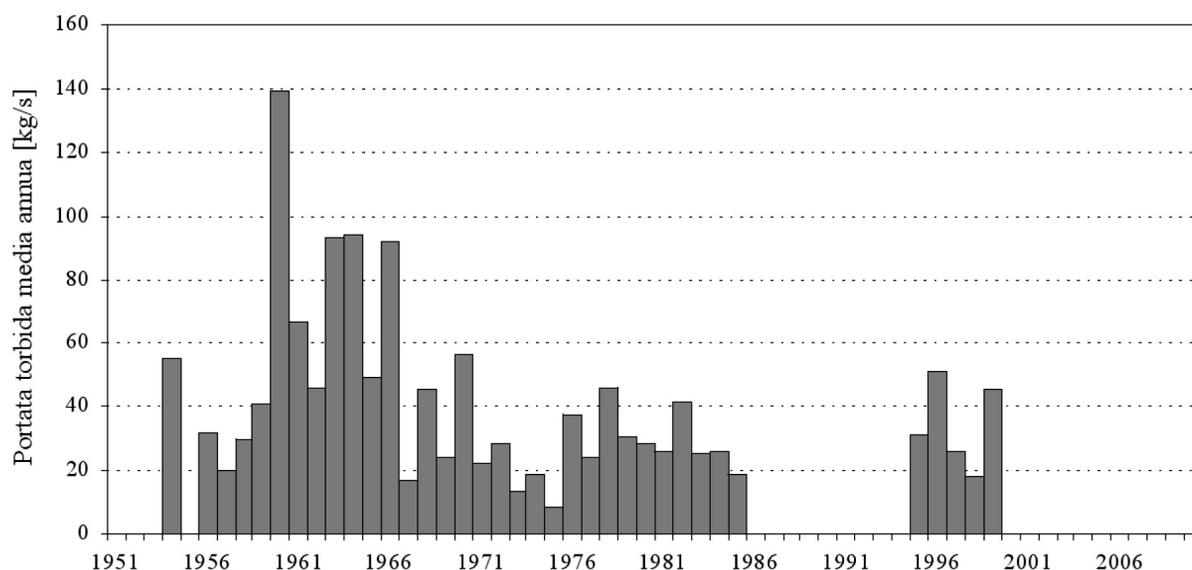


Fig. 4 - Portate torbide [kg/s] alla stazione di San Giovanni alla Vena (PI). Negli anni tra il 1986 e il 1994, e successivamente al 1999, non risultano misure di portata torbida.

Tab. 8 - Concessioni per l'estrazione di inerti dall'alveo del F. Arno [m ³] (dati informali dell'Ufficio Tecnico del Genio Civile di Pisa).			
Tratti di asta fluviale	Periodi	Volume totale [m ³]	Volume annuo [m ³ /anno]
S. Giovanni alla Vena - foce	1935-1951	135.000	7.941
S. Giovanni alla Vena - foce	1952-1969	1.784.880	99.160
S. Giovanni alla Vena - foce	1969-1970	173.000	86.500
Rio Arnino - Pisa	1950-1969	2.000.000	100.000

al 1969, furono di due milioni di metri cubi (Rapetti & Vittorini, 1974). Tra S. Giovanni alla Vena e la foce, nel periodo 1952-1969 le concessioni ammontarono a 1.784.880 m³ (Cavazza & Panico, 1977). La stima dei volumi di inerti effettivamente prelevati dal fiume è tuttavia molto incerta, sia per la difficoltà di reperimento dei dati relativi ai tratti più a monte, sia per la non verificabile corrispondenza tra i volumi prescritti nelle concessioni e i volumi effettivamente estratti.

Gli effetti di tali prelievi sono invece noti, considerato che tra il 1935 e il 1963, nel tratto di asta fluviale tra S. Giovanni Valdarno e Caprona presso Calci, si verificò l'abbassamento medio dell'alveo di 174 cm, con gravi danni ai pilastri di sostegno dei diciassette ponti allora esistenti (Bendini, 1964).

Dal 1989 l'estrazione di inerti dagli alvei è autorizzata dall'Autorità di Bacino, con vincoli che riguardano i volumi prelevabili e le sezioni fluviali, «al fine di prevenire il dissesto del territorio, inclusi erosione ed abbassamento degli alvei» (Legge n. 183/1989).

Per la stima dei volumi di inerti trascinati sul fondo si ricorre a formule empiriche (Yang & Wan, 1991), oppure a modelli matematici e statistici (Becchi, 1985; Cao *et al.*, 2011), nei quali sono considerati parametri quali le dimensioni dei clasti presenti sul fondo e le

condizioni geometriche ed idrauliche dell'alveo. La natura empirica delle formule implica alcune approssimazioni, come l'assunzione di moto stazionario uniforme del flusso idrico e l'inclinazione costante dell'alveo. La capacità di trasporto della corrente coincide inoltre con l'effettivo deflusso solido solo se viene totalmente soddisfatta dalla disponibilità del materiale d'alveo (Camenen & Larson, 2005).

La formula che sembra fornire stime più attendibili per alvei con caratteristiche simili a quelle del F. Arno è quella di Schoklitsch (1930):

$$G = \frac{K \times I^{1,5}}{\gamma \times \sqrt{d_{50}}} \times (Q - Q_0) \quad (2)$$

G: trasporto solido sul fondo [m³/s]; K: coefficiente dimensionale, assunto pari a 7.000 (Ruggiero, 1948); I: inclinazione dell'alveo, assunta pari a 6×10^{-4} ; γ : densità del sedimento [kg/m³]; d_{50} : diametro medio del sedimento [mm]; Q portata variabile [m³/s]; Q_0 portata limite [m³/s] al di sotto della quale il trasporto sul fondo è considerato nullo o trascurabile.

Parametri granulometrici e idraulici presso la foce del F. Arno

L'esame granulometrico delle sabbie presenti nell'alveo del F. Arno presso la foce fu effettuato su un campione considerato rappresentativo dei materiali che costituivano il letto fluviale negli ultimi cinque chilometri, che presentava il diametro medio $d_{50} = 0,63$ mm e la densità $\gamma = 2,5 \times 10^3$ kg/m³ (Ruggiero, 1948). Tali dati sono stati confermati da analisi successive, che hanno anche evidenziato una variabilità dimensionale di 0,5÷1,0 mm (Pranzini & Saggiocco, 1995).

Al fine di determinare la portata limite Q_0 per il movimento delle sabbie sul fondo, fu stabilita la relazione tra l'area di deflusso A e la portata Q (Ruggiero, 1948):

$$A = A_{\min} + k \times Q^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

con

$$k = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{Q_{\max}^{\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

dove A_{\min} (367 m²) e A_{\max} (574 m²) sono le aree della sezione bagnata del F. Arno presso la foce, corrispondenti rispettivamente all'altezza idrometrica minima e massima nelle condizioni di alveo del 1947, mentre Q_{\max} , pari a 2.000 m³/s, misurata nel corso della piena del 7 gennaio 1920, indica la portata corrispondente al valore massimo della sezione bagnata (Ruggiero, 1948). Lo studio idraulico, sviluppato con il supporto di un modello fisico a scala ridotta realizzato presso l'Istituto di Idraulica dell'Università di Pisa, consentì di stimare la sezione bagnata e la portata limite oltre le quali la velocità dell'acqua presso il fondo, esercitando una tensione tangenziale «efficace» sui clasti, determina il movimento di una massa statisticamente significativa di sedimenti di granulometria data. Dalla relazione 3 si ottiene:

$$A_0 = \frac{Q_0}{v_0} = A_{\min} + k \times Q_0^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

con la quale, nota la velocità limite ($v_0 = 0,30$ m/s), fu stimato il valore della portata limite ($Q_0 = 120$ m³/s) presso il fondo (Ruggiero, 1948). Sulla base di tali determinazioni il trasporto solido sul fondo (G) risulta dalla seguente relazione:

$$G = \frac{7.000 \times 0,0006^{\frac{3}{2}}}{2.500 \times \sqrt{0,63}} \times (Q - 120) \quad \left[\text{m}^3 / \text{s} \right] \quad (6)$$

Stima dei volumi di sabbie trasportati sul fondo nel 1939

Dall'applicazione della (6) furono ricavati i valori di G (Tab. 8) e indicate le frequenze delle singole portate, dedotte dai valori medi giornalieri del 1939 (le portate di quell'anno ebbero carattere medio rispetto al periodo 1936-1939). Le classi di portata furono definite da Ruggiero (1948) secondo intervalli di 100 m³/s da 121 a 1.000 m³/s e di 500 m³/s da 1.000 a 2.000 m³/s, inserendo nel calcolo il valore massimo della classe. Moltiplicando i valori di G per la frequenza e sommando si ottenne il volume potenziale totale di sabbia trasportato alla foce dell'Arno nel 1939.

Ai criteri seguiti da Ruggiero si è ritenuto di apportare alcune modifiche, quali l'assunzione del valore medio delle classi di portata in luogo del valore massimo, perché ritenuto sovrastimante il trasporto sul fondo, e i valori medi giornalieri per l'indisponibilità dei dati orari. Tali modifiche determinano per il 1939 i volumi potenziali rispettivamente di 117.320 m³ (Ruggiero) e di 89.882 m³ (Tab. 9).

Stima dei volumi di sabbie trasportati sul fondo nel periodo 1951-2010

L'andamento interannuale dei volumi potenziali di sabbia trasportati alla foce del F. Arno presenta una generale tendenza alla diminuzione, pur con alcune significative fluttuazioni: dopo un periodo di intenso trasporto potenziale, concentrato tra la fine degli anni Cinquanta e la prima metà degli anni Sessanta, i valori si sono attestati tra 30.000 e 40.000 m³/anno, prossimi al valore medio del periodo in esame, che è stato di 45.097 m³ e valori minimi e massimi assoluti rispettivamente di 4.806 m³ (2007) e 153.289 m³ (1960). Negli ultimi anni si osserva una ripresa del trasporto potenziale, con un picco di 135.446 m³ nel 2010 (massimo secondario della serie) e valori di 69.681 e 79.336 m³ nel 2004 e nel 2005 (Fig. 5).

Scansione temporale delle portate liquide e trasporto sul fondo

Gli idrogrammi di piena dei fiumi si caratterizzano per una variabilità temporale delle altezze idrometriche e delle portate, funzione della morfologia dell'alveo, del regime idrologico e degli interventi di utilizzazione e di controllo dei deflussi. Considerato che la relazione tra le portate liquide ed il volume di materiali trasportati sul fondo è di tipo non lineare, è necessario, per il calcolo accurato dei volumi potenziali, disporre dei valori delle portate liquide con una scansione semioraria o oraria. Per valutare l'errore relativo che si commette assumendo la scansione giornaliera in luogo di quella oraria, sono state analizzate le piene del 2 dicembre e del 25 dicembre 2010, delle quali il Servizio Idrologico Regionale della Toscana ha reso disponibili gli idrogrammi (Fig. 6, Tab. 10).

Considerando rispettivamente la portata oraria e la portata media giornaliera si ottengono i valori di 3.174 m³ e di 3.248 m³ (2 dicembre) e di 6.456 m³ e di 5.028 m³ (25 dicembre 2010). Nei due casi le differenze risultano trascurabili per valori delle portate inferiori a 1.000 m³/s; per valori superiori, fino a 2.000 m³/s, per la diversa

Tab. 9 - Stima del volume potenziale [m³] trasportato nell'anno 1939.

Classi di portata	Stima Ruggiero				Stima Monti e Rapetti			
	Q [m ³ /s]	G [m ³ /s]	Freq. [gg]	Vol. [m ³]	Q [m ³ /s]	G [m ³ /s]	Freq. [gg]	Vol. [m ³]
1.501-2.000	2.000	0,0970	0,16	1.340	1.750	0	0	0
1.001-1.500	1.500	0,0715	0,34	2.100	1.250	0	0	0
901-1.000	1.000	0,0455	1,50	5.920	950	0,0427	2	7.386
801-900	900	0,0405	1,00	3.00	850	0,0376	1	3.248
701-800	800	0,0350	5,00	15.200	750	0,0324	5	14.016
601-700	700	0,0300	3,00	7.800	650	0,0273	3	7.075
501-600	600	0,0250	1,00	2.160	550	0,0221	1	1.913
401-500	500	0,0198	11,00	18.800	450	0,0170	11	16.152
301-400	400	0,0144	12,00	14.800	350	0,0118	12	12.281
201-300	300	0,0093	29,00	23.200	250	0,0067	29	16.775
121-200	200	0,0042	62,00	22.500	160	0,0021	62	11.035
				117.320				89.882

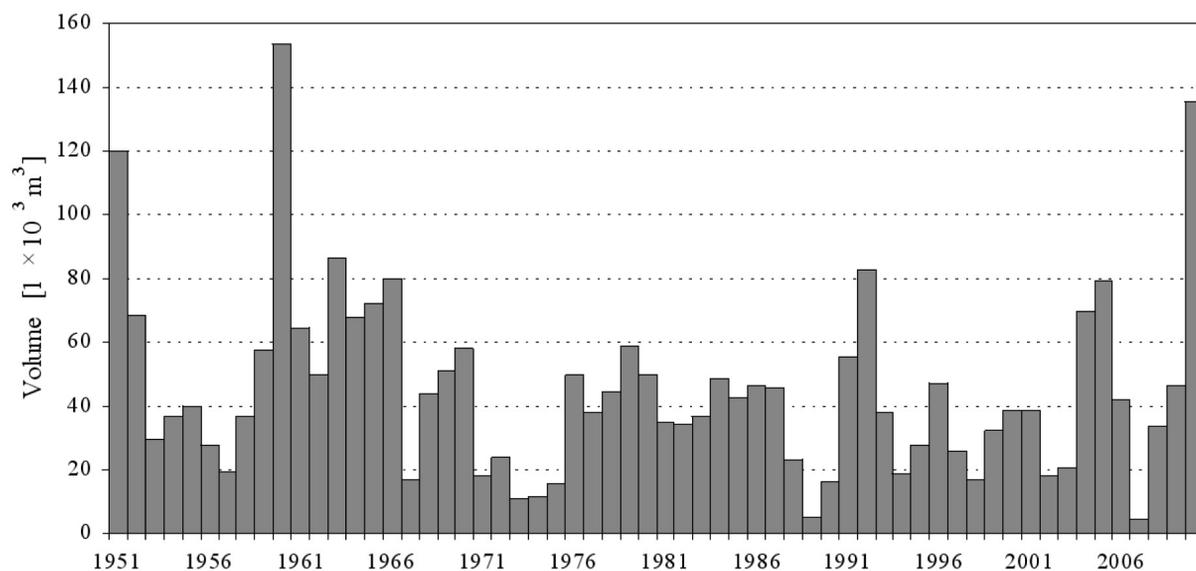


Fig. 5 - Volumi potenziali di sabbia trasportati sul fondo alla foce del F. Arno nel periodo 1951-2010.

definizione delle classi di portata, lo scarto è invece rilevante.

CONCLUSIONI

Il volume di sabbie trasportate dal F. Arno presso la foce, costituisce, insieme ai fattori concorrenti, come l'energia dell'ondazione, le correnti litoranee, le variazioni eustatiche del livello marino, la subsidenza della piana costiera, un fattore determinante nella dinamica del litorale pisano.

La componente in sospensione del trasporto solido è

stata misurata in alcuni periodi tra il 1936 e il 1995, e presenta la tendenza alla diminuzione. La frazione torbida è tuttavia utilizzabile solo in piccola parte per il ripascimento delle spiagge, poiché i frammenti più fini sedimentano in mare aperto durante i periodi di acque calme. L'assenza di studi sistematici in questo campo rende perciò difficile la stima del contributo della frazione torbida al rifornimento della spiaggia.

Il trasporto solido sul fondo viene valutato con formule che presentano varianti in relazione alle dimensioni dei clasti trasportati sul fondo e alle caratteristiche geometriche e idrauliche dei fiumi presso la foce: in questa ricerca è stata utilizzata la relazione di Schoklitsch

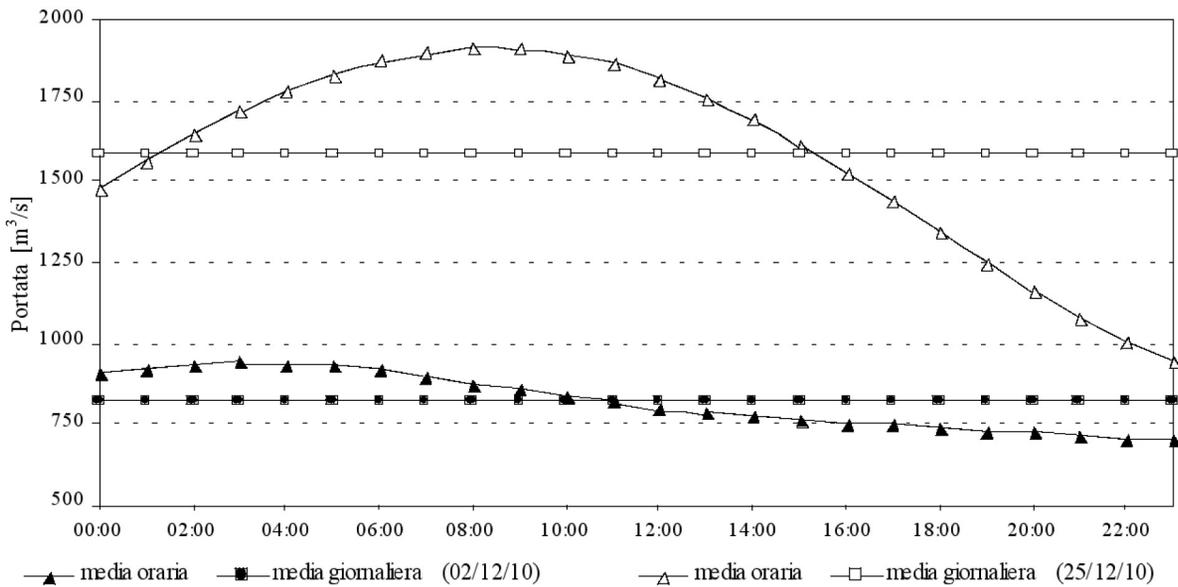


Fig. 6 - Portate di piena del F. Arno a S. Giovanni alla Vena del 2 e del 25 dicembre 2010 (fonte: Servizio Idrologico della Regione Toscana).

Tab. 10 - Stime dei volumi [m^3] trasportati il 2 ed il 25 dicembre 2010, calcolati sulla base delle portate orarie e della portate medie giornaliere.

	2 dicembre 2010				25 dicembre 2010			
	dato orario		dato giornaliero		dato orario		dato giornaliero	
Classi di portata [m^3/s]	Freq. [h]	Vol. [m^3]	Freq. [h]	Vol. [m^3]	Freq. [h]	Vol. [m^3]	Freq. [h]	Vol. [m^3]
1.501-2.000	0	0	0	0	16	4.835	0	0
1.001-1.500	0	0	0	0	7	1.467	24	5.028
901-1.000	7	1.077	0	0	1	154	0	0
801-900	6	812	24	3.248	0	0	0	0
701-800	11	1.285	0	0	0	0	0	0
		3.174		3.248		6.456		5.028

(1930), con alcune modifiche rispetto all'applicazione già sviluppata nello studio del Comune di Pisa (Ruggero, 1948).

L'andamento interannuale dei volumi potenziali di sabbia trasportati alla foce del F. Arno presenta, seppur con alcune significative fluttuazioni, una generale tendenza alla diminuzione: tra la fine degli anni Cinquanta e la prima metà degli anni Sessanta si stimano intensi trasporti potenziali, con massimo assoluto di $153.289 m^3$ nel 1960, seguiti negli anni successivi da volumi medi di 30.000 e $40.000 m^3/anno$. Negli ultimi anni, sebbene il minimo assoluto si sia verificato nel 2007 ($4.806 m^3$), si osserva una ripresa del trasporto potenziale, con un picco di $135.446 m^3$ nel 2010 (massimo secondario della serie).

Una delle condizioni per la corrispondenza tra i dati stimati e quelli reali consiste nella piena disponibili-

tà di sedimenti in alveo, che, nel corso del periodo, non sempre è stata soddisfatta, poiché fino al 1969, dall'alveo del F. Arno e dai suoi affluenti, sono stati estratti ingenti volumi di inerti, soprattutto negli anni Sessanta; né possono essere trascurati i materiali sottratti al movimento verso la foce dalla cattura operata dagli invasi artificiali della Penna e di Levane, costruiti alla fine degli anni Cinquanta (provincia di Arezzo) e, in anni più recenti, dalla diga del Bilancino (provincia di Firenze), terminata alla fine degli anni Novanta.

I risultati della ricerca dimostrano che il F. Arno e il suo bacino, in presenza di eventi pluviometrici estesi e prolungati, nonostante le modificazioni che hanno interessato l'unità fisiografica, conservano la capacità di sviluppare elevate portate liquide e rilevanti trasporti potenziali di sabbie sul fondo.

BIBLIOGRAFIA

- Alvarez W., Coccozza T., Wezel F., 1974. Fragmentation of the Alpine orogenic belt by microplate dispersal. *Nature* 248: 309-314.
- Becchi I., 1985. On the accuracy of sediment transport measurements in the field. In: *The dynamics of alluvial rivers*, Genova: 187-199.
- Bendini C., 1964. Gli abbassamenti dell'alveo del fiume Arno, nei tronchi da Caprona a Firenze – km 78 – e da Figline Valdarno a Monteverchi – km 12. I Convegno degli ingegneri idraulici del corpo del Genio Civile. Parma, 30 ottobre-1 novembre 1963.
- Bendini C., 1969. Il porto turistico e peschereccio di Marina di Pisa, *Boll. degli Ingegneri di Firenze e Toscana* 7: 7-28.
- Bini M., Casarosa N., Ribolini A., 2008. L'evoluzione diacronica della linea di riva del litorale pisano (1938-2004) sulla base del confronto di immagini aeree georeferenziate. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem., Ser. A* 113: 1-12.
- Boccaletti M., Elter P., Guazzone G., 1971. Plate tectonic model for the development of the Western Alps and Northern Apennines. *Nature* 234: 108-110.
- Camenen B., Larson M., 2005. A general formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuar. Coast. Shelf S.* 63: 249-260.
- Cao Z., Hu P., Pender G., 2011. Multiple time scales of fluvial processes with bed load sediment and implications for mathematical modeling. *J. Hydraul Eng-Asce* 137: 267-276.
- Cavazza S., 1984. Regionalizzazione geomorfologica del trasporto solido in sospensione nei corsi d'acqua tra il Magra e l'Ombro. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem., Serie A* 91: 119-132.
- Cavazza S., Panico A., 1977. Note preliminari sulle variazioni morfologiche del tronco terminale del fiume Arno. In: *Atti del Convegno di studi per il riequilibrio della costa fra il fiume Magra e Marina di Massa*, Massa 2-4 giugno 1977: 157-162.
- Cortemiglia G.C., Rapetti F., Viti F., 2011. Analisi climatica della serie termopluviometrica storica (1813-2008) rilevata nell'Osservatorio Ximeniano di Firenze. *Riv. Geogr. Ital., I*, 118: 83-114.
- Kligfield R., 1979. The Northern Apennines as a collisional orogen. *Am. Journ. Sc.* 279: 676-691.
- Mancini F., 1956. Torbide dell'Arno a Firenze nel 1954. *Riv. Di Sc. Nat., Natura* 47: 3-23.
- Mazzanti R., Trevisan L., 1978. Evoluzione della rete idrografica nell'Appennino centro-settentrionale. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 1: 55-62.
- Ministero LL. PP., Servizio Idrografico e Mareografico di Pisa, vari anni. *Annali Idrologici*, Parte II. Poligr. dello Stato, Roma.
- Natoni E., 1944. *Le piene dell'Arno e i provvedimenti di difesa*. Felice Le Monnier, Firenze.
- Noli A., Franco L., 1989. L'evoluzione del litorale pisano: risultati di uno studio con impiego di modelli matematici. Camera di Commercio Industria Artigianato di Pisa, Amministrazione Provinciale di Pisa, Comune di Pisa. Giardini Editore, Pisa: 1-37.
- Rapetti F., 1971. Le acclività del bacino dell'Arno in rapporto con i caratteri geolitologici. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem., Ser. A* 78: 62-104.
- Rapetti F., Vittorini S., 1974. Osservazioni sulle variazioni dell'ala destra del Delta dell'Arno. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem., Ser. A* 81: 25-88.
- Rapetti F., Vittorini S., 1978. Osservazioni sul clima del litorale pisano. *Riv. Geogr. It.* 85: 1-26.
- Rapetti F., Vittorini S., 1984. Brevi considerazioni sull'influenza dei venti riguardo alle fluttuazioni della linea di costa del litorale di S. Rossore (Pisa). In: *Tongiorgi M., Vittorini S. (Eds.), Nuovi dati di osservazione sulla spiaggia campione di S. Rossore (Pisa)*. *Suppl. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem., Ser. A* 90: 13-20.
- Rapetti F., Vittorini S., 1996. Caratteristiche climatiche del bacino del Fiume Arno. In: *Piano di bacino del Fiume Arno - Rischio idraulico*. Autorità di di Bacino del Fiume Arno: 367.
- Ruggiero C., 1948. Le possibilità di ripascimento del litorale di Marina di Pisa. Relazione della Commissione Comunale presieduta dal Prof. Ing. C. Ruggiero. Ed. Pacini Mariotti, Pisa: 25-54.
- Schoklitsch A. 1930. *Handbuch des Wasserbaues*. Springer, Vienna, 1: 1-475.
- Thorntwaite C.W., Mather J.R., 1957. Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Climatology* 10: 3.
- Toniolo A.R., 1927. Variazioni storiche del litorale toscano tra l'Arno e la Magra. *Atti del X Congresso Geogr. Ital.*, 1, Milano: 314-330.
- Van Rijn L.C. 1984a. Sediment transport, Part I: bed load transport. *J. Hydraul Eng-Asce* 110: 1431-1456.
- Van Rijn L.C. 1984b. Sediment transport, Part II: suspended load transport. *J. Hydraul Eng-Asce* 110: 1613-1641.
- Vittorini S., 1991. La diminuzione del trasporto torbido nei fiumi italiani tra il periodo prebellico e quello attuale. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 14 (2): 251-258.
- Yang C.T., Wan S., 1991. Comparisons of selected bed-material load formulas. *J. Hydraul Eng-Asce*, 117: 973-989.

SITI

www.adbarno.it

(ms. pres. il 25 luglio 2011; ult. bozze il 30 luglio 2012)