



ATTI  
DELLA  
SOCIETÀ TOSCANA  
DI  
SCIENZE NATURALI

MEMORIE • SERIE A • VOLUME CXXIII • ANNO 2016



Edizioni ETS



Con il contributo del Museo di Storia Naturale dell'Università di Pisa



e della Fondazione Cassa di Risparmio di Lucca

## INDICE - CONTENTS

<p>F. ALQUINI, D. BERTONI, G. SARTI – Extreme erosion of a dune crest within a short timespan (January-September 2016): the recent case in the Migliarino - San Rossore - Massaciuccoli Regional Park (Tuscany, Italy). <i>Erosione molto accentuata della cresta di una duna frontale in un breve periodo di tempo (gennaio-settembre 2016): il recente caso nel Parco Regionale di Migliarino - San Rossore - Massaciuccoli (Toscana, Italia).</i></p>	pag. 5	<p>M. BELGIORNO, P. MARIANELLI, G. PASQUINI, A. SBRANA – A contribution to the study of a Pisa alluvial plain sector for low temperature geothermal assessment. <i>Un contributo allo studio di un settore della piana alluvionale di Pisa ai fini di una valutazione geotermica a bassa temperatura.</i></p>	» 17
<p>P. BILLI – Variation of the hydrological characteristics of rivers in Italy throughout the last 80 years. <i>Variazione delle caratteristiche idrologiche dei fiumi in Italia negli ultimi 80 anni.</i></p>	» 25	<p>M. LEZZERINI, M. TAMPONI, G. D'AMATO AVANZI, S. IACCARINO, N. PERCHIAZZI – XRF analysis of major and minor elements in silicate rocks using fused glass discs at high dilution ratio. <i>Determinazione XRF degli elementi maggiori e minori in rocce silicatiche utilizzando dischi fusi con alti rapporti di diluizione.</i></p>	» 55
<p>A. COLLARETA – Fossil turtle and whale barnacles (Crustacea: Cirripedia: Coronuloidea) kept at the Natural History Museum of Pisa University: an annotated catalogue. <i>Cirripedi fossili simbionti dei vertebrati marini (Crustacea: Cirripedia: Coronuloidea) nelle collezioni del Museo di Storia Naturale dell'Università di Pisa: un catalogo annotato.</i></p>	» 41	<p>S. MERLINO – OD character and polytypic features of the structure of the molecular crystal (1R,3S)-dimethyl 2-oxocyclohexane-1,3-dicarboxylate. <i>Carattere OD e aspetti politipici della struttura del cristallo molecolare (1R,3S)-dimethyl 2-oxocicloesano-1,3-dicarbossilato.</i></p>	» 61
<p>S. FARINA – Catalogue of the late Pleistocene-Holocene fossil mammalian collection from "Canale delle Acque Alte (Canale Mussolini)" (Natural History Museum, University of Pisa). <i>Catalogo della collezione a mammiferi fossili del Pleistocene Superiore - Olocene di "Canale delle Acque Alte (Canale Mussolini)" (Museo di Storia Naturale dell'Università di Pisa).</i></p>	» 47	<p>C. MONTEMAGNI, P. FULIGNATI, S. IACCARINO, P. MARIANELLI, C. MONTOMOLI, A. SBRANA – Deformation and fluid flow in the Munsiri Thrust (NW India): a preliminary fluid inclusion study. <i>Deformazione e "fluid flow" lungo il Munsiri Thrust (India NW): studio preliminare su inclusioni fluide.</i></p>	» 67
		<p>N. PERCHIAZZI, P. ARMIENTI, S. IACCARINO, M. LEZZERINI – A contribution to the mineralogy of the Larderello geothermal field. X-ray crystallographic studies on borate minerals "bechilite" and "lagonite" and crystal structure determination of ginorite. <i>Contributo alla mineralogia del campo geotermico di Larderello. Studi cristallografici a raggi X dei borati "bechilite" e "lagonite" e determinazione strutturale della ginorite.</i></p>	» 79
		<p>L. ROOK, Un ricordo di Augusto Azzaroli (1921-2015) <i>In memory of Augusto Azzaroli (1921-2015)</i></p>	» 89
		<p>Processi Verbali - <a href="http://www.stsn.it">http://www.stsn.it</a></p>	» 101



PAOLO BILLI (\*)

## VARIAZIONE DELLE CARATTERISTICHE IDROLOGICHE DEI FIUMI IN ITALIA NEGLI ULTIMI 80 ANNI

**Abstract** - *Variation of the hydrological characteristics of rivers in Italy throughout the last 80 years.* The hydrological data of 23 flow gauges distributed across the Italian territory have been examined in order to verify the occurrence of temporal trends and their rates of change. Aiming to work on pattern of change of average values of the parameters considered, the data used in this study have been standardized and mean historical series, representative of the whole Italian territory, have been obtained. The results indicate that all the parameters considered show a decreasing trend for precipitation, runoff, maximum discharge and discharge exceed 10 days a year. These results depict for Italy a framework of substantial decrease of water resources and sediment transport capacity. In order to investigate the role of the upstream catchment area in determining the variability of a few of the parameters considered in this study, simple regression analyses have been performed, which demonstrate a high degree of accuracy in predicting specific discharges also for rivers without flow records or insufficient flow data. doi: 10.2424/ASTSN.M.2016.17

**Key words** - runoff, precipitation, runoff coefficient, maximum discharge, dominant discharge, rivers, Italy

**Riassunto** - *Variatione delle caratteristiche idrologiche dei fiumi in Italia negli ultimi 80 anni.* I dati idrologici di 23 stazioni idrometriche sparse sul territorio italiano sono stati utilizzati per verificare l'esistenza di trend temporali e valutarne l'entità. Per una analisi degli andamenti medi della variabilità nel tempo dei parametri considerati, i dati utilizzati sono stati normalizzati e si sono definite delle serie storiche medie, rappresentative del territorio italiano. I risultati indicano una generale tendenza alla diminuzione di afflussi, deflussi, portata massima e portata superata 10 giorni l'anno, disegnando un quadro di sostanziale diminuzione delle risorse idriche in Italia e della capacità del trasporto solido. Per alcuni parametri si è analizzato il ruolo dell'area del bacino idrografico sotteso nel determinare la variabilità dei parametri idraulici considerati e sono stati definiti dei semplici modelli di stima che sono risultati avere un alto grado di affidabilità. doi: 10.2424/ASTSN.M.2016.17

**Parole chiave** - deflussi, afflussi, coefficiente di deflusso, portata massima, portata formativa, fiumi, Italia

### INTRODUZIONE

Da tempo si parla del cambiamento globale (principalmente variazioni climatiche ed impatto umano) e degli effetti che questo può avere sul ciclo idrologico (Doll *et al.*, 2009; EEA, 2012). Oramai sono abbastanza evi-

denti gli effetti che le variazioni climatiche degli ultimi decenni hanno avuto e stanno avendo sui deflussi idrici stagionali o annuali dei corsi d'acqua e sulla frequenza ed intensità delle alluvioni. Questi fenomeni hanno delle implicazioni negative sulle risorse idriche in generale e sulle attività economiche ad esse connesse suscitando interesse e al tempo stesso preoccupazione tra coloro che sono preposti alla pianificazione e gestione del territorio (Binder, 2006). Per questo motivo molti studiosi si sono impegnati nell'analizzare e caratterizzare la variabilità nel tempo delle portate e nel cercare una connessione con la circolazione atmosferica ed il clima (Chiew & McMahon, 2002; Barnett *et al.*, 2005; Nohara *et al.*, 2006; Dai *et al.*, 2009; Fu *et al.*, 2009; Gosling *et al.*, 2011) o con varie attività umane che interferiscono con il flusso dei corsi d'acqua o implicano lo sfruttamento delle risorse idriche in generale (Doll *et al.*, 2009; Vogl & Lopes, 2009). In riferimento a tutto questo, Hannah *et al.* (2011) hanno chiaramente messo in evidenza l'importanza vitale di disporre di archivi relativi a serie storiche di dati di portata per l'analisi della variabilità idrologica nel recente passato, per lo sviluppo di modelli di predizione delle condizioni future e per risolvere problemi contingenti connessi con aspetti operazionali e di progettazione ingegneristica (Marsh, 2002).

Molti dei modelli per le proiezioni dei cambiamenti idrologici a livello globale si basano su estese serie di dati idroclimatici per la loro parametrizzazione, validazione e calibrazione e quindi, come enfatizzato da Bordi *et al.* (2009) e dal rapporto dell'EEA (2012), è molto importante disporre di osservazioni aggiornate per poter aumentare l'affidabilità di questi modelli, soprattutto per studi a grande scala ed in un contesto globale di riduzione delle stazioni di misura (Hannah *et al.*, 2011).

Nel rapporto dell'EEA (2012), che si basa essenzialmente su uno studio di Stahl *et al.* (2010), vengono analizzate le variazioni dei deflussi mensili nel periodo 1962-2004 per molti fiumi europei e sono riportati anche i risultati di uno studio di Rojas *et al.* (2012) che quantifica la previsione di variazione in termini percentuali dei deflussi fluviali nell'intervallo 2071-2100.

(\*) International Platform for Dryland Research and Education (IPDRE), Tottori University, Tottori, Japan. Email: bli@unife.it

In quest'ultimo lavoro sono stati utilizzati modelli di trasformazione afflussi-deflussi che poi sono stati validati attraverso l'applicazione ed il confronto con dati idrologici di diversi fiumi che, per quanto riguarda l'Italia, ha preso in considerazione soltanto il F. Po alla stazione idrometrica più a valle di Pontelagoscuro (ubicata nei pressi di Ferrara e a circa 75 km dalla foce). Nel lavoro di Stahl *et al.* (2010), invece, non è stato considerato nessun corso d'acqua italiano.

Il Global Runoff Data Centre (GRDC) dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) e il FRIEND European Water Archive dell'UNESCO-IHP rappresentano i due più importanti archivi al mondo contenenti dati idrologici di diverse migliaia (9000 stazioni presso il GRDC) di corsi d'acqua in tutti i continenti. Nell'archivio del GRDC sono comprese una ventina di stazioni idrometriche su 15 fiumi italiani, ma per la maggior parte di esse le serie di dati mensili sono molto brevi, coprendo solo gli ultimi 10-15 anni, oppure terminano agli anni '90, anche per i fiumi più importanti come il Po, l'Adige o il Tevere. Per i dati giornalieri le serie sono ancora più brevi e nella maggior parte dei casi abbracciano solo alcuni anni. Inoltre la lunghezza delle serie più estese non corrisponde alla realtà in quanto non sono state considerate le interruzioni delle misure (come per esempio per il periodo bellico), spesso della durata anche di diversi anni, come nel caso del passaggio dal Servizio Idrografico Nazionale a quelli regionali in cui talora si registrano delle interruzioni di dati anche di 20 anni. Nell'European Water Archive dell'UNESCO-IHP è presente invece un grande numero di stazioni idrometriche italiane, ma la carta indice interattiva rappresenta più un catalogo delle stazioni attive che una vera e propria fonte di informazioni in quanto, salvo rare eccezioni e per periodi brevissimi, non risultano essere presenti dati. Questi archivi hanno contribuito sostanzialmente al miglioramento delle conoscenze sulle risorse idriche del passato e sulle tendenze idrologiche in atto a livello globale anche se molti studiosi (Bordi *et al.*, 2009; Hannah *et al.*, 2011) sottolineano la necessità di allargare il data base e soprattutto di aggiornarlo.

Da tutto ciò emerge chiaramente che, per i motivi oggettivi prima esposti, i dati dei fiumi italiani non sono stati utilizzati nelle più importanti modellazioni idrologiche a grande scala e che nessuno studio a livello nazionale è stato prodotto su queste tematiche per quanto la loro importanza sia evidente per una stima affidabile delle variazioni delle risorse idriche in Italia negli anni a venire.

È proprio per contribuire a rispondere a questa impellente esigenza di colmare una così grande lacuna che è stato avviato il presente studio che ha come obiettivo principale quello di analizzare le variazioni di alcuni parametri idrologici dei fiumi italiani nel corso degli ultimi 80 anni.

## FIUMI STUDIATI

Il sistema di rilievo delle portate è iniziato in Italia alla fine del 1800 con misure sporadiche su alcuni fiumi. È però dopo l'istituzione del servizio idrografico nazionale nel 1917 che si è cominciato ad eseguire un monitoraggio regolare di diversi fiumi, iniziando dal F. Po, utilizzando criteri scientifici e strumentazioni moderne. Sebbene negli anni il numero delle stazioni idrometriche sia aumentato, i rilievi sulla maggior parte dei corsi d'acqua non sono stati continui nel tempo. In alcuni casi, infatti, le misure sono state cessate e talora riprese solo dopo molti anni, altre stazioni sono state abbandonate definitivamente, mentre altre nuove sono state realizzate sugli stessi fiumi, ma in località diverse, o su fiumi non monitorati prima, soprattutto nell'ultimo decennio. Il risultato di questa situazione è che, purtroppo, ad eccezione dei fiumi Po, Arno, Ombrone, Tevere ed Oreto (un piccolo fiume siciliano), che presentano delle serie relativamente continue a partire dagli anni 20 del ventesimo secolo, solo per pochi altri fiumi è possibile recuperare serie storiche abbastanza lunghe e con relativamente pochi dati mancanti. L'elenco dei fiumi e delle 23 stazioni idrometriche considerati in questo studio è riportato nella Tab. 1 e la loro ubicazione geografica è indicata nella Fig. 1.



Fig. 1 - Corsi d'acqua considerati in questo studio. I numeri si riferiscono agli idrometri di Tab. 1.

Tab. 1 - Corsi d'acqua studiati ed idrometro di riferimento

NO.	FIUME	IDROMETRO	AREA* (km <sup>2</sup> )
1	Arno	Subbiano	738
2	Arno	Nave di Rosano	4083
3	Arno	S. Giov. alla Vena	8186
4	Sieve	Fornacina	831
5	Chiana	P.te Ferrovia FI-RM	1272
6	Elsa	Castelfiorentino	806
7	Cecina	Monterufoli	634
8	Farma	P.te di Torniella	70
9	Cornia	P.te SS Aurelia	356
10	Ombrone	Sasso d'Ombrone	2657
11	Reno	Casalecchio	1051
12	Reno	Bastia	3410
13	Samoggia	Calcara	175
14	Ofanto	Monteverede	1028
15	Ofanto	S.Samuele di Cafiero	2716
16	Salsola	P.te SS FG-S.Severo	463
17	Po	Pontelagoscuro	70091
18	Adige	Boara Pisani	11954
19	Brenta	Barziza	1567
20	Tevere	Roma (Ripetta)	16545
21	Oreto	Parco	76
22	Eleuterio	Lupo	10
23	Imera Meridionale	Capodarso	631

(\*) L'area corrisponde all'area del bacino effettivamente sottesa dall'idrometro.

I bacini sottesi dalle stazioni considerate in questo studio hanno un'area assai variabile tra i 10 km<sup>2</sup> del F. Eleuterio a Lupo ed i 70019 km<sup>2</sup> del Po a Pontelagoscuro e sono rappresentate un po' tutte le scale di grandezza tra questi due estremi (Tab. 1).

RACCOLTA DATI E METODI

I dati utilizzati in questo studio provengono esclusivamente dagli annali idrografici del Servizio Idrografico Nazionale, che sono stati pubblicati fino a circa la metà degli anni '90, e dagli archivi dei vari servizi regionali, ai quali è stata passata la competenza del monitoraggio delle acque interne nel 1998, fino ad oggi. Come accennato, questi dati presentano delle lacune che si è cercato di colmare utilizzando metodi diversi quali una semplice analisi correlativa o con i metodi proposti da Dery *et al.* (2005) nel caso di presenza di più stazioni sullo stesso corso d'acqua o attraverso un confronto con sistemi fluviali vicini.

Il primo metodo di Dery *et al.* (2005), impiegato da questo autore per ricavare dati mancanti di deflusso, è definito come:

$$R_d = R_u A_d / A_u \quad [1]$$

In cui  $R$  è il deflusso,  $A$  l'area del bacino ed il pedice  $d$  indica il dato di valle ed  $u$  quello di monte. Il secondo metodo è invece definito dalla seguente relazione:

$$R_3 = (R_1 + R_2) / (R_{m1} + R_{m2}) \times R_{m3} \quad [2]$$

In cui  $R_3$  è il dato mancante che si vuole ricostruire;  $R_1$  ed  $R_2$  sono i dati omologhi di sistemi fluviali vicini;  $R_{m1}$ ,  $R_{m2}$  ed  $R_{m3}$  sono i valori medi delle serie considerate.

Tutti questi metodi, testati su dati noti di alcune serie, non hanno però prodotto risultati accettabili e si è quindi optato per l'analisi delle serie naturali senza aggiungere dati ottenuti con manipolazioni che comportano lo stesso grado d'incertezza dei dati originali. L'inefficacia dei metodi descritti dipende essenzialmente da differenze geo-litologiche, geomorfologiche, fisiografiche, di permeabilità dei suoli, di copertura vegetale, tutti fattori che rendono ogni sistema fluviale praticamente unico nella risposta agli afflussi meteorici.

I dati raccolti per ogni stazione idrometrica si riferiscono agli afflussi ( $P$ ), ai deflussi ( $R$ ) e al coefficiente di deflusso ( $CD = R/P$ ) annui e la portata media massima giornaliera ( $Q_{max}$ ) più elevata e la portata superata 10 giorni all'anno ( $Q_{10g}$ ) misurati per ogni anno di osservazione. E' opportuno precisare che la portata massima giornaliera non coincide con la portata massima defluita in una data sezione in un certo giorno, ovvero la portata di picco ( $Q_p$ ), ma con il valore medio massimo rilevato in quel giorno. E' evidente quindi che  $Q_{max}$  è solitamente minore di  $Q_p$ , (ad eccezione di piene con idrogramma poco pronunciato e molto prolungate nel tempo), mentre  $Q_{10g}$  è sempre minore di  $Q_{max}$ . Con questi cinque parametri,  $P$ ,  $R$ ,  $CD$ ,  $Q_{max}$  e  $Q_{10g}$  (con l'esclusione di  $Q_p$  di cui sono riportati sugli annali solo alcuni valori in coincidenza di eventi di piena particolarmente intensi), sono stati costruiti i diagrammi delle serie temporali (82 in totale) ed è stata tracciata la linea di tendenza, prendendo nota del relativo coefficiente angolare il cui segno, come è noto, indica se la tendenza è a crescere (segno più) o a decrescere (segno meno). Al fine di poter definire un andamento medio per l'Italia, i dati delle serie temporali considerate sono stati normalizzati secondo la variabile  $z$  definita come:

$$z = (n-m)/s \quad [3]$$

In cui  $n$  è il valore di un dato anno,  $m$  la media dei va-

lori nella serie ed  $s$  la deviazione standard della serie. In questo modo è possibile confrontare l'andamento delle variazioni dei parametri indipendentemente da fattori di scala e costruire una serie  $Z$  derivante dalla media delle varie serie  $z$  relative ad ogni stazione idrometrica. L'intervallo temporale scelto per questa operazione è quello compreso tra il 1931 ed il 2011. Come già accennato, nelle serie sono presenti dei dati mancanti che non è stato possibile ricavare in modo indiretto con un sufficiente grado di attendibilità. Questo intervallo è stato quindi scelto perché nella matrice dei dati, relativi a tutte le stazioni considerate, si è osservato che i valori mancanti sono distribuiti abbastanza casualmente ed in modo relativamente omogeneo non andando così ad attribuire ad una serie un peso relativo maggiore o minore e garantendo quindi una discreta affidabilità del risultato finale. Pur con le limitazioni del caso, evidenziate all'inizio del paragrafo e legate appunto alla presenza di discontinuità nelle serie, questo metodo offre comunque un'idea, se non altro semiquantitativa, dell'andamento nel tempo delle variabili analizzate.

Per ogni serie sono stati poi calcolati i valori della portata formativa per tre intervalli distinti: pre-1951; 1951-1980; 1981-2011. Gli ultimi due periodi hanno ciascuno una durata di 30 anni mentre per il primo alcune stazioni hanno durate leggermente più brevi. Si è però ritenuto utile utilizzare anche questi dati, sebbene non proprio omogenei con gli altri per avere un raffronto con le condizioni idrologico-ambientali precedenti l'industrializzazione dell'Italia. Secondo le normative dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale infatti 30 anni sono l'intervallo di tempo giusto per rappresentare la condizione climatica normale di un territorio (Mariani, 2006) e quindi anche per un confronto tra periodi diversi all'incirca della stessa durata.

La portata formativa (o portata dominante) è per definizione quella portata che nel lungo termine svolge la maggior parte del lavoro ed è quella che più di altre è responsabile della parte più consistente del trasporto solido e che quindi determina anche la morfologia dell'alveo (Leopold *et al.*, 1964). Secondo la maggior parte degli autori (per es. Andrews, 1980; Torizzo & Pitlick, 2004) questa portata, definita comunemente come "bankfull discharge", ovvero portata ad alveo pieno, cioè una portata il cui livello coincide con quello del ciglio delle sponde naturali ed è quindi compresa interamente negli argini naturali, ha un tempo di ritorno compreso tra 1.58 e 2.33 anni. Questi due valori coincidono rispettivamente con la piena più frequente (classe modale) e con la piena media. Quest'ultima non va confusa con la portata media che è il valore medio di tutte le portate giornaliere misurate in un anno, ma coincide con la tendenza centrale della distribuzione di Gumbel.

In questo studio si è quindi scelto di utilizzare come portata formativa ( $Q_{bkf}$ ) la portata relativa alla piena

più frequente, cioè quella con un tempo di ritorno di 1.58 anni, calcolata con il metodo degli eventi estremi di Gumbel, in quanto si è ritenuto che questa fosse più indicativa delle condizioni di trasporto solido in relazione ai noti fenomeni di abbassamento degli alvei e di arretramento delle spiagge che sono comuni praticamente su tutto il territorio italiano.

Per calcolare la  $Q_{bkf}$  sono però necessari i valori di portata di picco ( $Q_p$ ) e non quelli di portata massima media giornaliera, che sono invece normalmente disponibili negli annali idrologici. Per ottenere quindi dei dati coerenti con l'analisi che ci si è proposti è stato costruito un diagramma di conversione che, basandosi su 159 dati di portata di picco riportati sugli annali idrologici, relativamente a 56 corsi d'acqua su tutto il territorio italiano, associati ad altrettanti dati di portata massima giornaliera misurati nello stesso giorno, consente di ricavare i dati di picco e quindi di calcolare correttamente la portata formativa partendo dai dati di  $Q_{max}$ . Si sono quindi plottati in un diagramma le coppie di valori  $Q_{max}$  e  $Q_p$  e si è ottenuta l'equazione della retta d'interpolazione attraverso la quale è possibile convertire i dati di portata massima giornaliera nei valori di  $Q_{bkf}$  (Fig. 2). Il semplice modello lineare così ottenuto ha un coefficiente di determinazione  $R^2$  piuttosto alto di 0.85, mentre l'equazione della retta è:

$$Q_p = 7.9117(Q_{max})^{0.7518} \quad [4]$$

Purtroppo i dati di trasporto torbido riportati negli annali sono molto scarsi, misurati su pochissimi fiumi e per intervalli di tempo spesso molto brevi. In mancanza di dati originali, la variazione della portata formativa nei tre periodi indicati assieme ai diagrammi delle serie temporali della portata superata 10 giorni l'anno possono surrogare un'informazione qualitativa della variazione della capacità di trasporto solido nel tempo nei fiumi considerati anche se, ovviamente, non può tenere conto delle variazioni di uso del suolo/copertura vegetale che si sono succedute specialmente nella seconda parte del XX secolo, e quindi delle condizioni di alimentazione dei sedimenti da monte.

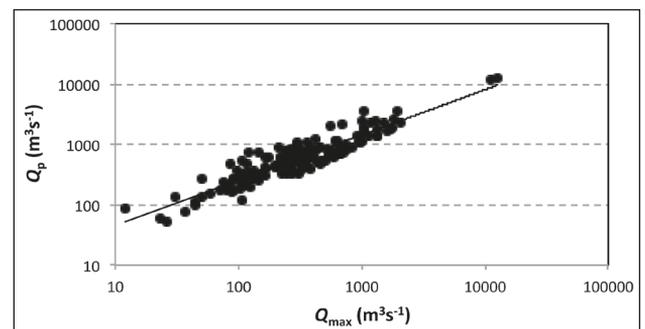


Fig. 2 - Correlogramma tra portata massima giornaliera ( $Q_{max}$ ) e portata di picco ( $Q_p$ ).

Tab. 2 - Afflussi e deflussi medi annui e loro coefficiente di variazione (CV) e coefficiente di deflusso medio annuo (CD)

NO.	FIUME	IDROMETRO	AFFLUSSI (MM/A)	CV	DEFLUSSI (MM/A)	CV	CD
1	Arno	Subbiano	1240.4	0.18	673.3	0.36	0.54
2	Arno	Nave di Rosano	1001.3	0.18	401.0	0.36	0.40
3	Arno	S. Giov. alla Vena	986.4	0.17	333.3	0.35	0.34
4	Sieve	Fornacina	1170.0	0.17	540.8	0.33	0.46
5	Chiana	P.te FFSS FI-RM	804.9	0.20	173.7	0.55	0.22
6	Elsa	Castelfiorentino	826.4	0.20	180.0	0.47	0.22
7	Cecina	Monterufoli	900.6	0.18	299.5	0.53	0.33
8	Farma	P.te di Torniella	1064.8	0.21	402.3	0.42	0.38
9	Cornia	P.te SS Aurelia	882.1	0.18	259.3	0.50	0.29
10	Ombrone	Sasso d'Ombrone	878.9	0.18	272.5	0.41	0.31
11	Reno	Casalecchio	1307.4	0.46	711.0	0.32	0.54
12	Reno	Bastia	948.4	0.17	373.5	0.31	0.39
13	Samoggia	Calcara	913.2	0.24	301.2	0.50	0.33
14	Ofanto	Monteverede	872.4	0.13	229.0	0.48	0.26
15	Ofanto	S.Samuele di Cafiero	723.5	0.15	145.3	0.47	0.20
16	Salsola	P.te SS FG-S.Severo	646.0	0.19	88.2	0.59	0.14
17	Po	Pontelagoscuro	1095.8	0.20	678.4	0.26	0.62
18	Adige	Boara Pisani	905.5	0.15	555.5	0.26	0.61
19	Brenta	Barziza	1298.5	0.16	1336.6	0.18	1.03
20	Tevere	Roma (Ripetta)	1047.7	0.18	440.8	0.26	0.42
21	Oreto	Parco	1035.5	0.36	442.2	0.36	0.43
22	Eleuterio	Lupo	828.0	0.23	201.4	0.62	0.24
23	Imera Merid.	Capodarso	554.8	0.28	99.7	0.79	0.18

## RISULTATI

La precipitazioni medie annue registrate per i fiumi studiati variano tra un minimo di 554.8 mm per il F. Imera Meridionale a Capodarso in Sicilia ai 1307.4 mm del F. Reno a Casalecchio (Tab. 2). Presso questa stazione si rileva anche il più alto valore del coefficiente di variazione ( $CV = 0.46$ ), mentre il più basso lo si registra per il F. Ofanto a Monteverde. Anche se le precipitazioni più basse cadono sul bacino più meridionale, i dati non mostrano un chiaro andamento nord-sud, come ci si potrebbe aspettare, con molti fiumi dell'Appennino Centrale e Meridionale che ricevono afflussi paragonabili o in alcuni casi anche superiori a quelli settentrionali (essenzialmente il Po) e alpini. Anche per il coefficiente di variazione non si riscontra un sostanziale allineamento con la distribuzione delle caratteristiche climatiche medie sulla penisola.

I deflussi medi annui minori si osservano sul F. Salsola con 88.2 mm, mentre il F. Brenta a Barziza mostra quelli più consistenti con 1336.6 mm ed il più basso valore del coefficiente di variazione (0.18) (Tab. 2). Il valore più alto di  $CV$  si osserva invece per il F. Imera Meridionale con 0.79. Quanto detto per gli afflussi in

termini di variabilità nord-sud vale anche per i deflussi ed i relativi coefficienti di variazione che non mostrano un chiaro trend spaziale.

Il coefficiente di deflusso medio annuo ( $CD$ ), espressione del rapporto tra deflussi ed afflussi medi annui, varia tra un minimo di 0.14 per il F. Salsola ad un massimo di 1.03 per il Brenta (Tab. 2). In quest'ultimo caso, il volume d'acqua defluito attraverso la sezione di Barziza è praticamente uguale alle precipitazioni cadute sul bacino sotteso. Questa è una situazione non comune in quanto, come è noto, generalmente il coefficiente di deflusso è inferiore ad 1, con valori che tipicamente variano tra 0.2 e 0.6. Nel caso specifico, la presenza di numerose sorgenti carsiche contribuisce però a mantenere un certo flusso di base anche in assenza di piogge continue e consistenti (Simonetto, 2011). Alcuni fiumi dell'Appennino Settentrionale sono caratterizzati da valori di  $CD$  inferiori ad alcuni corsi d'acqua meridionali a testimonianza, anche per il coefficiente di deflusso, dell'assenza di un chiaro trend spaziale. Ciò dipende da vari fattori tra i quali i principali sono le caratteristiche geo-litologiche del bacino (terreni più o meno permeabili) e la copertura vegetale.

Come già spiegato nella sezione precedente, la portata

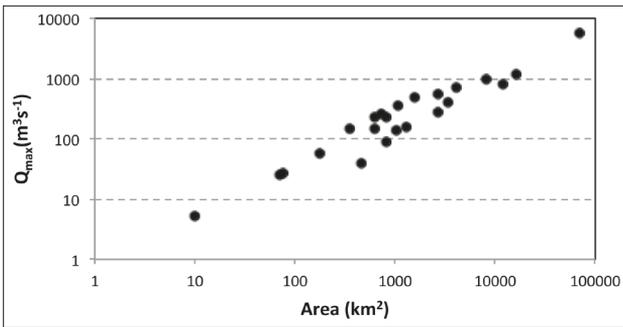


Fig. 3 - Correlazione tra area del bacino sotteso e portata massima giornaliera ( $Q_{max}$ ).

massima giornaliera ( $Q_{max}$ ) non è la portata massima registrata in un anno, ma il valore medio giornaliero più alto registrato in un anno. Fatto questo debito richiamo, non ci si può sorprendere del fatto che il valore più alto di  $Q_{max}$  sia quello registrato presso la stazione idrometrica di Pontelagoscuero sul Po, che sottende il bacino più esteso, mentre quello più basso è quello misurato sul F. Eleuterio, il cui bacino è di gran lunga il più piccolo. La dipendenza della portata massima giornaliera dall'area del bacino è bene illustrata nella Fig. 3 in cui la retta d'interpolazione ha un'equazione del tipo:

$$Q_{max} = 0.0771 A + 122.2 \quad [5]$$

ed un coefficiente di determinazione  $R^2 = 0.98$ . Questo risultato ci dice che l'area del bacino a monte ( $A$ ) spiega il 98% della variabilità di  $Q_{max}$  e quindi ci consente di usare l'eq.5 come uno strumento molto affidabile per la stima della portata massima giornaliera di corsi d'acqua non monitorati.

Il coefficiente di variazione di  $Q_{max}$  è in generale piuttosto alto per tutti i fiumi ed è compreso tra 0.30 e 0.91, con una media di 0.60. Questo dato non sorprende vista la stretta dipendenza delle portate di piena dalla variabilità dell'intensità e durate delle piogge.

La portata superata 10 giorni l'anno ( $Q_{10g}$ ) è stata presa in considerazione in quanto, come accennato precedentemente, rappresenta una portata che in forma generale potremmo associare al limite inferiore delle portate in grado di mobilitare sedimenti del letto e rappresenta quindi la soglia idraulica oltre la quale si hanno, per esempio, gli apporti di sabbia a mare (Pickup & Warner, 1976; Powell *et al.*, 2001; Preciso *et al.*, 2012). La variazione della  $Q_{10g}$  nel tempo verso valori decrescenti, come analizzeremo meglio più avanti, indica per esempio una diminuzione nella capacità del fiume di trasportare i sedimenti di fondo.

Il confronto tra i dati di  $Q_{max}$  e  $Q_{10g}$  ci mostra che mediamente la portata massima è 3.4 volte più grande di quella superata 10 giorni l'anno con valori del rap-

porto  $Q_{max}/Q_{10g}$  che variano tra un minimo di 2 per il Tevere ed un massimo di 6.3 per il F. Cornia alla stazione idrometrica presso il ponte della Strada Statale Aurelia. Il rapporto  $Q_{max}/Q_{10g}$  tende a diminuire con l'aumentare dell'area del bacino sotteso anche se in questo caso il coefficiente di determinazione della funzione di potenza d'interpolazione è più basso ( $R^2 = 0.67$ ) (Fig. 4):

$$Q_{max}/Q_{10g} = 12.96 A^{-0.19} \quad [6]$$

Il valore più basso di  $Q_{10g}$  si registra sul F. Farma, con  $6.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , mentre quello più alto, ovviamente, si osserva sul Po con  $3951 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (Tab. 3).

Purtroppo per questo parametro non sono disponibili i dati per i tre corsi d'acqua siciliani, che probabilmente avrebbero mostrato il valore più basso con i due fiumi più piccoli, ovvero il F. Oreto ed il F. Eleuterio. Nonostante la mancanza di questi dati, anche per  $Q_{10g}$  si riscontra una stretta correlazione con l'area del bacino (Fig. 5) e attraverso la seguente equazione della retta d'interpolazione, che ha un coefficiente di determinazione  $R^2 = 0.99$ ,

$$Q_{10g} = 0.552 A + 22.9 \quad [7]$$

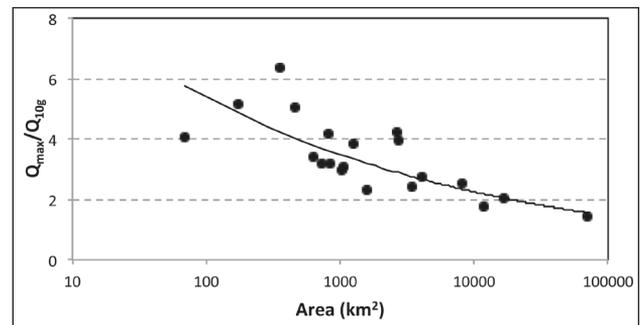


Fig. 4 - Correlazione tra area del bacino ed il rapporto tra portata massima giornaliera ( $Q_{max}$ ) e portata superata 10 giorni l'anno ( $Q_{10g}$ ).

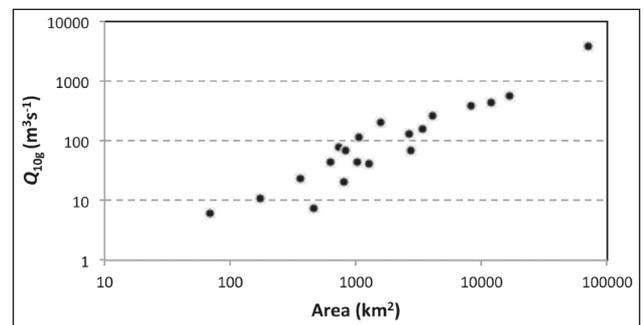


Fig. 5 - Correlazione tra area del bacino e portata superata 10 giorni l'anno ( $Q_{10g}$ ).

Tab. 3 - Portate media massime giornaliere ( $Q_{max}$ ), portate superate 10 giorni l'anno ( $Q_{10g}$ ) e loro coefficiente di variazione (CV).

NO.	FIUME	IDROMETRO	$Q_{max}$ ( $m^3s^{-1}$ )	CV	$Q_{10g}$ ( $m^3s^{-1}$ )	CV
1	Arno	Subbiano	254.7	0.56	79.7	0.56
2	Arno	Nave di Rosano	721.9	0.42	264.5	0.42
3	Arno	S. Giov. alla Vena	966.7	0.48	379.3	0.48
4	Sieve	Fornacina	223.7	0.32	70.1	0.32
5	Chiana	P.te FFSS FI-RM	159.5	0.53	41.3	0.53
6	Elsa	Castelfiorentino	87.1	0.80	21.0	0.80
7	Cecina	Monterufoli	149.4	0.68	44.2	0.68
8	Farma	P.te di Torniella	25.1	0.83	6.2	0.83
9	Cornia	P.te SS Aurelia	148.2	0.88	23.4	0.88
10	Ombrone	Sasso d'Ombrone	547.3	0.63	130.3	0.63
11	Reno	Casalecchio	345.5	0.46	112.0	0.46
12	Reno	Bastia	391.8	0.40	162.2	0.40
13	Samoggia	Calcara	56.4	0.81	10.9	0.81
14	Ofanto	Monteverede	135.8	0.65	45.4	0.65
15	Ofanto	S.Samuele di Cafiero	273.8	0.66	69.2	0.66
16	Salsola	P.te SS FG-S.Severo	38.5	0.75	7.6	0.75
17	Po	Pontelagoscuro	5574.6	0.30	3951.2	0.30
18	Adige	Boara Pisani	787.6	0.40	444.6	0.40
19	Brenta	Barziza	472.3	0.51	203.9	0.51
20	Tevere	Roma (Ripetta)	1164.2	0.41	575.1	0.41
21	Oreto	Parco	26.3	0.79		
22	Eleuterio	Lupo	5.3	0.72		
23	Imera Merid.	Capodarso	231.0	0.91		

è possibile stimare la portata superata 10 giorni l'anno, con un elevato grado di affidabilità, per fiumi di cui non vi sia disponibilità di serie storiche delle portate. Il coefficiente di variazione di  $Q_{10g}$  varia poco attorno al valore medio di 0.57 con un minimo di 0.32 per il F. Sieve a Fornacina ed un massimo di 0.88 per il F. Cornia (Tab. 3).

#### 4.1. Trend temporali

Per tutti i parametri considerati in questo studio, ovvero afflussi, deflussi, coefficiente di deflusso, portata massima e portata superata 10 giorni l'anno, si sono costruiti i diagrammi della loro variazione nel tempo ed i coefficienti angolari delle linee di tendenza sono stati riportati nella Tab. 4. Dei 103 valori riportati in tabella solo quattro sono positivi, indicando quindi una tendenza all'aumento nel tempo, uno è uguale a zero, a testimonianza di nessuna variazione nel tempo, mentre gli altri 98 hanno tutti segno meno e descrivono un quadro generale di chiara diminuzione delle risorse idriche in Italia. Non potendo, per ovvie ragioni di spazio, riportare tutti e 103 i diagrammi delle serie tem-

porali, saranno brevemente commentati alcuni esempi rappresentativi per ogni parametro considerato.

La Fig. 6 mostra le serie temporali di afflussi e deflussi rilevati sul F. Arno a S. Giovanni alla Vena. Ambedue i parametri diminuiscono secondo un andamento praticamente parallelo delle linee di tendenza; diverso è invece il caso dell'Arno a Subbiano i cui deflussi diminuiscono ad un tasso due volte e mezzo più rapido degli afflussi (Fig. 7). Solo il Po e il F. Eleuterio a Lupo mostrano una maggior riduzione degli afflussi rispetto ai deflussi. Questo fa sì che soltanto in questi due fiumi si osservi una tendenza positiva del coefficiente di deflusso (Tab. 4), mentre per tutti gli altri si osserva una chiara riduzione nel tempo che è molto marcata per il F. Ofanto a Monteverde e per l'Arno a Subbiano (Fig. 8).

La portata massima giornaliera di alcuni tra i fiumi più grandi come l'Adige a Boara Pisani, il Tevere a Roma e l'Arno a S. Giovanni alla Vena, mostra un tasso di diminuzione molto pronunciato (Fig. 9), mentre il Po è caratterizzato da una tendenza esattamente opposta (Fig. 10).

Questa diversità di risposta si osserva anche per la

Tab. 4 - Coefficienti angolari delle rette di tendenza

NO.	FIUME	IDROMETRO	P	R	$Q_{max}$	$Q_{10g}$	CD
1	Arno	Subbiano	-2.00	-5.36	-0.21	-0.65	-0.0032
2	Arno	Nave di Rosano	-1.61	-1.74	-3.16	-1.06	-0.0015
3	Arno	S. Giovanni alla Vena	-1.44	-1.39	-5.52	-0.41	-0.0008
4	Sieve	Fornacina	-2.60	-3.64	-0.62	-0.51	-0.0019
5	Chiana	P.te FFSS FI-RM	-1.72	-1.50	-1.38	-0.29	-0.0017
6	Elsa	Castelfiorentino	-0.05	-1.08	-0.16	-0.03	-0.0011
7	Cecina	Monterufoli	-1.95	-4.95	-2.27	-0.83	-0.0044
8	Farma	P.te di Tornarella	-2.30	-8.41	-0.46	-0.12	-0.0076
9	Cornia	P.te SS Aurelia	-3.43	-1.07	-1.57	0.00	-0.0013
10	Ombrone	Sasso d'Ombrone	-1.77	-2.20	-2.78	-0.48	-0.0020
11	Reno	Casalecchio	-1.25	-3.53	-0.99	-0.63	-0.0023
12	Reno	Bastia	-1.20	-1.47	-1.97	-2.16	
13	Samoggia	Calcara	-3.50	-3.69	-1.25	-0.13	-0.0023
14	Ofanto	Monteverede	-1.51	-4.95	-3.15	-1.13	-0.0051
15	Ofanto	S.Samuele di Cafiero	-1.23	-2.06	-3.44	-1.13	-0.0024
16	Salsola	P.te SS FG-S.Severo	-2.16	-1.14	0.18	-0.04	0.0000
17	Po	Pontelagoscuro	-1.98	-0.26	6.12	5.58	-0.0033
18	Adige	Boara Pisani			-4.57		
19	Brenta	Barziza			-1.45		
20	Tevere	Roma (Ripetta)	-3.07	-2.20	-6.06		-0.0010
21	Oreto	Parco	-4.55	-3.54	-0.39		-0.0014
22	Eleuterio	Lupo	-3.96	-0.84	-0.02		0.0009
23	Imera Merid.	Capodarso	-0.94	-0.71	-0.39		-0.0011
	<b>Media</b>		<b>-2.11</b>	<b>-2.65</b>	<b>-1.54</b>	<b>-0.24</b>	<b>-0.0022</b>

P = afflussi; R = deflussi;  $Q_{max}$  = portata media massima giornaliera;  $Q_{10g}$  = portata superata 10 giorni l'anno; CD = coefficiente di deflusso.

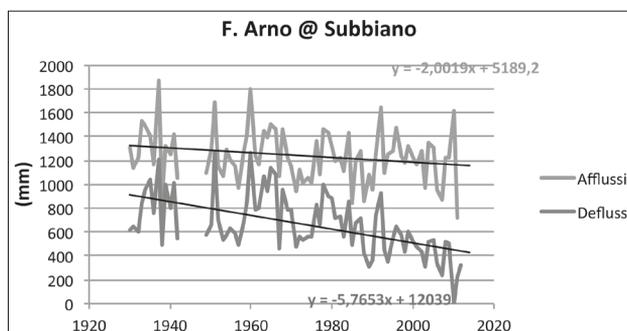
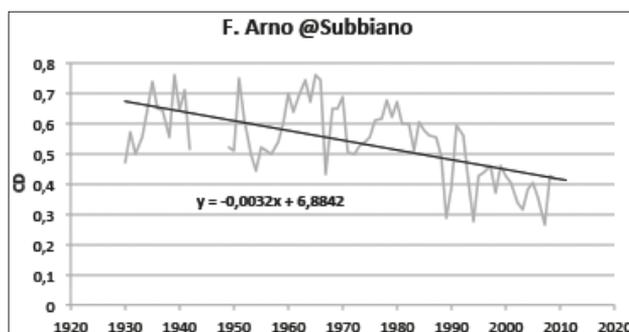
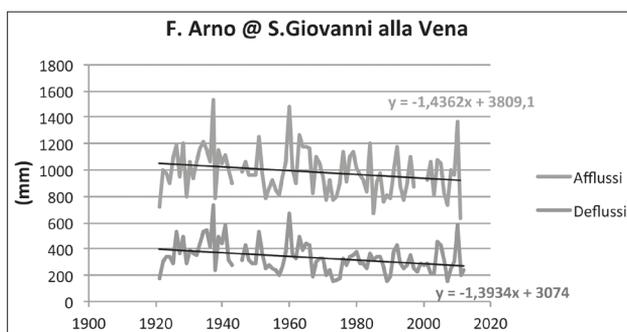


Fig. 6 - Variazione nel tempo di afflussi e deflussi presso la stazione idrometrica di S. Giovanni alla Vena sul F. Arno.

Fig. 7 - Variazione nel tempo di afflussi e deflussi presso la stazione idrometrica di Subbiano sul F. Arno.

Fig. 8 - Variazione nel tempo del coefficiente di deflusso presso la stazione idrometrica di Subbiano sul F. Arno.

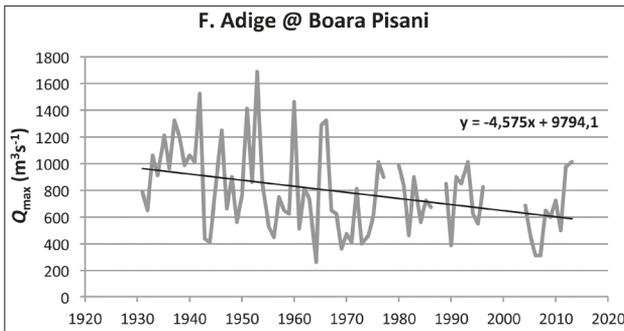


Fig. 9 - Variazione nel tempo della portata massima giornaliera per il F. Adige presso la stazione idrometrica di Boara Pisani.

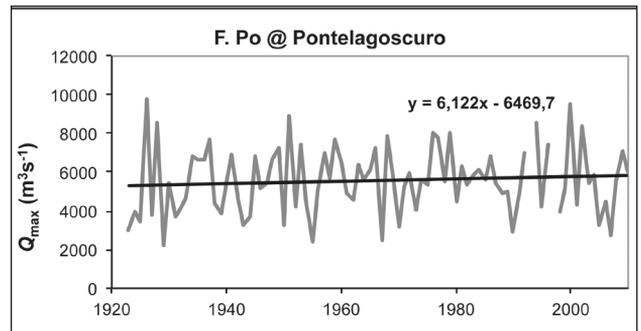


Fig. 10 - Variazione nel tempo della portata massima giornaliera per il F. Po presso la stazione idrometrica di Pontelagoscuro.

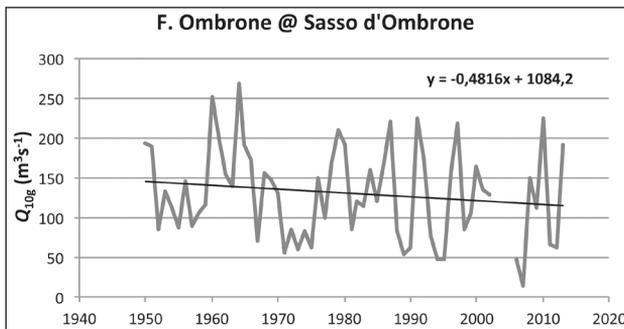


Fig. 11 - Variazione nel tempo della portata superata 10 giorni l'anno per il F. Ombrone presso la stazione idrometrica di Sasso d'Ombrone.

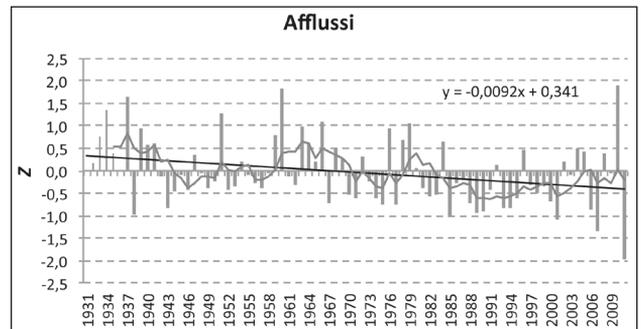


Fig. 12 - Serie temporale media per gli afflussi sul territorio italiano. In nero la linea d'interpolazione ed in rosso la media mobile con un passo di cinque anni.

$Q_{10g}$  che, ad eccezione appunto del Po (Fig. 11), mostra in tutti i fiumi una netta tendenza alla diminuzione (Tab. 4).

Allo scopo di verificare un andamento medio per tutta l'Italia di tutti questi parametri per tutti i fiumi compresi in questo studio, che possiamo considerare come rappresentativi delle diverse regioni geografiche d'Italia, si è proceduto, come accennato in precedenza, alla standardizzazione dei dati secondo la variabile  $z$  (vedi eq. 4), su un arco di tempo compreso tra il 1931 ed il 2011, in modo tale da poter descrivere la variazione nel tempo dei parametri considerati in forma indipendente da fattori quali la scala del bacino o l'entità stessa del parametro analizzato per fiumi con caratteristiche idrologiche e climatiche diverse. In questo modo è possibile descrivere in forma relativa la variabilità di un parametro costruendo una matrice di dati omologhi, nonostante le grandi differenze idrologiche e fisiografiche dei bacini considerati. Grazie a questa trasformazione dei dati è stato quindi possibile calcolare un valore medio  $Z$  di tutte le variabili  $z$  calcolate per ogni anno per tutti i fiumi in modo tale da ottenere un singolo diagramma della variazione nel tempo del parametro analizzato che possiamo considerare come

rappresentativo per tutta l'Italia (vedi Fig. 12, 13, 14, 15 e 16).

Per meglio cogliere l'andamento temporale di serie storiche eliminando l'effetto di disturbo dovuto a fluttuazioni di breve periodo, nelle Fig. 12-16, oltre alla linea di tendenza è stata tracciata anche la media mobile con un passo di 5 anni.

Tutte le serie temporali dei valori medi di  $Z$  mostrano tendenze negative con andamenti simili per i cinque parametri analizzati, descrivendo quindi un quadro di chiara diminuzione delle risorse idriche e della capacità di trasporto dei sedimenti in Italia. Al fine di fornire un ulteriore elemento di verifica delle mutate condizioni idraulico/idrologiche che stanno interessando i fiumi italiani, è stata calcolata anche la portata formativa ( $Q_{bkf}$ ) che, come accennato in precedenza, viene identificata dalla maggior parte degli autori come quella avente un tempo di ritorno compreso tra 1.58 e 2.33 anni (in questo studio si è utilizzata quella con tempo di ritorno di 1.58 anni, corrispondente alla classe modale della piene, ovvero alla piena più frequente). Come si è già detto, la portata formativa è quella che nel lungo termine svolge la maggior parte del lavoro ed è quindi responsabile della maggior parte del volume

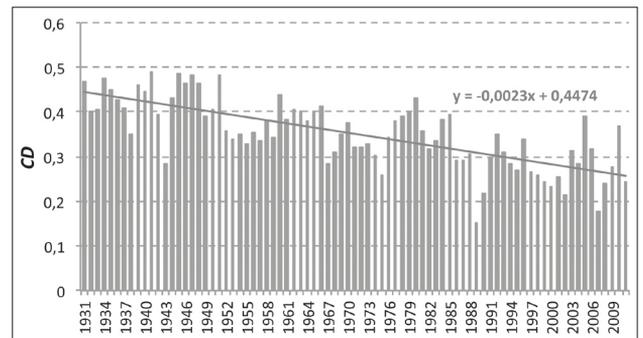
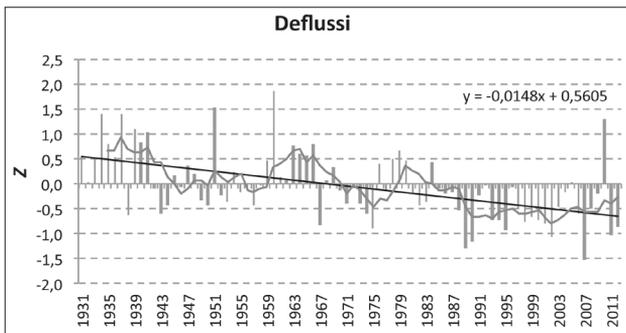


Fig. 13 - Serie temporale media per i deflussi idrici in Italia. In nero la linea d'interpolazione ed in rosso la media mobile con passo di cinque anni.

Fig. 14 - Serie temporale media per il coefficiente di deflusso in Italia. In rosso la retta di tendenza.

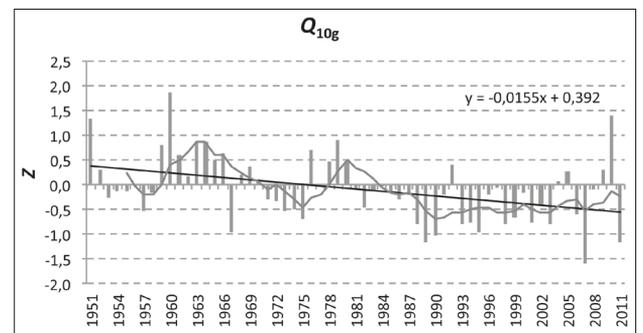
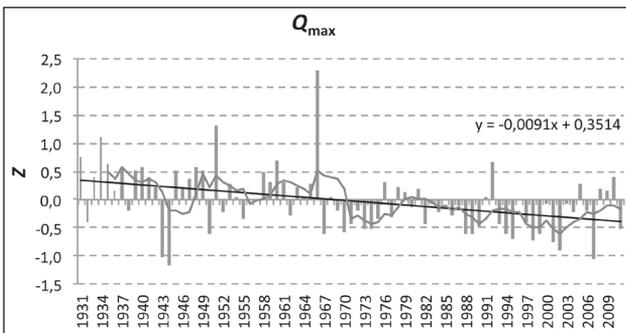


Fig. 15 - Serie temporale media per la portata massima giornaliera in Italia. In nero la linea d'interpolazione ed in rosso la media mobile con passo di cinque anni.

Fig. 16 - Serie temporale media per la portata superata 10 giorni l'anno in Italia. In nero la linea d'interpolazione ed in rosso la media mobile con passo di cinque anni.

Tab. 5 - Portata formativa,  $Q_{bkt}$  ( $m^3s^{-1}$ ) (con tempo di ritorno di 1.58 anni), in vari periodi.

FIUME	IDROMETRO	A	B	C	C-A	B-A	C-B
		pre-1951	1951-1980	1981-2011			
Arno	Subbiano	432.6	409.4	398.3	-34.3	-23.2	-11.1
Arno	Nave di Rosano	1126.2	926.5	828.9	-297.3	-199.7	-97.6
Arno	S.Giovanni alla Vena	1461.9	1057.2	989.6	-472.3	-404.7	-67.6
Sieve	Fornacina	411.9	377.0	365.1	-46.8	-34.9	-11.9
Chiana	P.te FFSS FI-Roma	381.1	316.9	213.2	-167.9	-64.2	-103.7
Cecina	Monterufoli	423.3	271.6	211.9	-211.4	-151.7	-59.8
Ombrone	Sasso d'Ombrone	1020.1	559.0	644.8	-375.3	-461.1	85.8
Reno	Casalecchio	618.6	527.2	443.1	-175.5	-91.4	-84.0
Reno	Bastia	1305.9	1303.8	1257.5	-48.4	-2.0	-46.4
Samoggia	Calcara		153.2	81.8			-71.4
Ofanto	Monteverde		328.6	185.9			-142.7
Ofanto	S.Samuele di Cafiero		459.1	323.3			-135.8
Salsola	P.te SS FG-S.Severo		109.2	76.2			-32.9
Po	Pontelagoscuro	4959.0	5338.0	5240.6	281.6	379.1	-97.5
Adige	Boara Pisani	1196.4	986.7	860.7	-335.8	-209.7	-126.1
Brenta	Barziza		680.7	639.1			-41.6
Tevere	Roma	1674.9	1419.7	1067.7	-607.2	-255.1	-352.1
Oreto	Parco	89.8	70.9	56.8	-33.0	-18.8	-14.2
Imera Merid.	Capodarso	187.1	192.8	134.3	-52.7	5.7	-58.4

di sedimenti trasportati a valle e quindi anche degli apporti a mare.

La  $Q_{bkf}$  di ogni fiume è stata calcolata per tre intervalli di tempo, di 30 anni corrispondenti ad un primo periodo pre-1951, 1951-1980 e 1981-2011.

I risultati di questa analisi sono riportati nella Tab. 5 che ci mostra chiaramente, ancora una volta, una tendenza negativa. La differenza tra il primo e l'ultimo periodo è sempre negativa con una diminuzione massima della portata formativa di  $607 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  del Tevere che dai  $1675 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  del periodo pre-1951 passa ai  $1068 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  del periodo 1981-2011. Il valore più basso di cambiamento si osserva invece per il F. Oreto a Parco con una diminuzione di soli  $33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Altri grandi fiumi, come l'Adige, l'Arno a S. Giovanni alla Vena e l'Ombrone, si caratterizzano per diminuzioni consistenti rispettivamente di  $336$ ,  $472$  e  $375 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , con in media una diminuzione del 28% e con un massimo del 50% per il F. Cecina a Monterufoli. Solo il Po ha un comportamento in controtendenza con un aumento di portata formativa tra il primo e l'ultimo periodo di ben  $282 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Anche le differenze tra il primo ed il secondo periodo sono tutte negative, ad eccezione del Po e dell'Imera meridionale ma solo con un aumento di  $5.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , così come quella tra il secondo ed il terzo periodo, e questa volta anche per il Po, ma con l'eccezione dell'Ombrone che mostra un aumento di  $86 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (Tab. 5). Questi dati indicano chiaramente che c'è stato un progressivo decremento della portata formativa negli ultimi 80 anni e che questo si è probabilmente riflesso anche in una diminuzione degli apporti di sabbia a mare, come testimoniato dai tantissimi casi in Italia di spiagge in erosione.

Utilizzando i dati di tutti i fiumi considerati in questo studio più altri, le cui serie sono abbastanza lunghe da poter ricavare un valore affidabile di portata formativa, per un totale di 38 corsi d'acqua sparsi su tutto il territorio Italiano, si è ottenuta una buona correlazione ( $R^2 = 0.85$ ) tra area del bacino sotteso ( $A$ ) e  $Q_{bkf}$  (Fig. 17) che consente di calcolare quest'ultimo importante parametro, con un buon grado di affidabilità (solo un 15% di errore), anche per altri fiumi non monitorati o con serie storiche non sufficientemente lunghe. Il modello di stima è definito dalla seguente equazione (Fig. 17):

$$Q_{bkf} = 4.7652 A^{0.613} \quad [8]$$

Infine, prendendo in considerazione tutti quei corsi d'acqua con una serie storica, anche non continua, di almeno 30 anni, sono stati estratti dagli annali idrologici i dati di massima piena osservata ( $Q_{mo}$ ) per 116 stazioni idrometriche relative a 100 fiumi, distribuiti su tutto il territorio Italiano. Le coppie di dati massima piena osservata e area del bacino sotteso sono stati plottati su un diagramma x-y (Fig. 18) e la retta d'inter-

polazione ha la seguente equazione:

$$Q_{mo} = 0.1998 A + 616.29 \quad [9]$$

il cui coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) è pari a 0.86. Anche in questo caso, l'area del bacino risulta essere un fattore importante nel determinare il comportamento idrologico dei corsi d'acqua italiani in quanto riesce a spiegare l'86% della variabilità della  $Q_{mo}$ . L'eq. 9 può quindi essere utilizzata per stimare la massima portata assoluta anche in quei corsi d'acqua in cui non sono presenti strumenti di misura delle portate o le serie storiche sono troppo brevi.

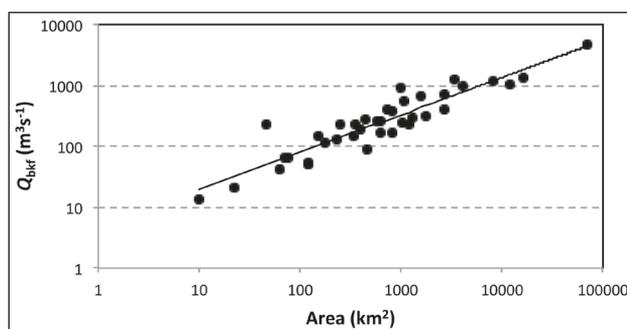


Fig. 17 - Correlazione tra area del bacino e portata formativa ( $Q_{bkf}$ ).

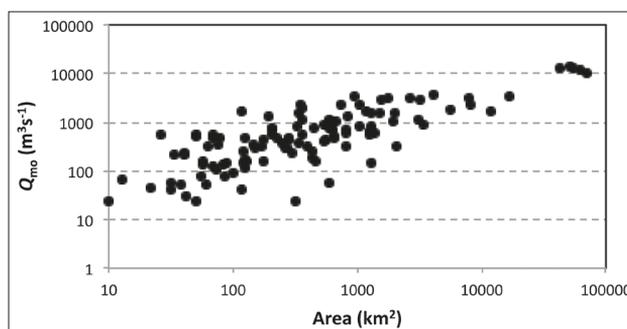


Fig. 18 - Correlogramma tra area del bacino e portata massima osservata ( $Q_{mo}$ ).

## DISCUSSIONE

Gli aspetti principali che si devono prendere in considerazione quando si vogliono analizzare dei trend temporali di dati idrologici sono, oltre alla qualità intrinseca del dato, la lunghezza e la continuità della serie. Mentre per altri dati meteorologici quali la temperatura o le precipitazioni sono disponibili metodi che consentono di omogenizzare le serie temporali e di colmare eventuali mancanze di dati, quando si utilizzano dati di portata liquida o solida, questa opera-

zione divine più difficile e molto spesso non produce risultati soddisfacenti. Questo dipende dal fatto che anche bacini idrografici contigui, di uguali dimensioni possono avere caratteristiche geologiche e di copertura vegetale molto diverse tali da rendere la loro risposta agli eventi di pioggia anche molto diversa. In questo studio si è, per esempio, cercato di verificare la correlazione tra piogge e deflussi annuali, ma questa è sempre risultata non sufficientemente significativa. Solo alcuni parametri, quali ad esempio la portata massima e quella di picco hanno mostrato una certa interdipendenza. Inoltre, quando si considerano dati diversi, come portate caratteristiche e afflussi, questi possono avere serie temporali non sovrapponibili. I casi più comuni riguardano per esempio la mancanza del dato di portata massima perché una piena più alta del normale può aver distrutto lo strumento di rilevazione, mentre i dati di pioggia possono invece essere disponibili. Altri problemi generali possono derivare dallo spostamento della stazione idrometrica, ma in questo studio sono stati considerati solo corsi d'acqua in cui tali spostamenti sono avvenuti a brevissima distanza senza una sostanziale variazione di area del bacino sotteso o l'aggiunta o perdita di affluenti.

Come già accennato, alcuni autori (Dery *et al.*, 2005) hanno proposto dei metodi per cercare di risolvere il problema della mancanza di dati di portata, ma questi hanno dimostrato di non essere affidabili con le serie utilizzate. Lo stesso si può dire per l'impiego di metodi autoregressivi, che possono funzionare bene per le temperature, ma che non danno buoni risultati per le piogge in quanto questo parametro è in generale poco autocorrelato così come lo sono i parametri di portata liquida e solida. Harvey *et al.* (2010) hanno testato 10 metodi diversi per la ricostruzione di dati idrometrici mancanti di 25 stazioni nel Regno Unito, ma nessuno di essi ha mostrato una validità generale. L'uso di alcuni dei metodi proposti in letteratura porta anche ad una estremizzazione del processo e quindi dell'affidabilità del risultato ottenuto con l'effetto negativo di introdurre un rumore di fondo che spesso può rendere ancora poco affidabile il dato, peggiorando la qualità della serie temporale (vedi a questo proposito l'analisi di Billi *et al.*, 2005).

Lo scopo di questo studio è quello di effettuare una prima analisi delle variazioni nel tempo dei parametri idrologici dei fiumi in Italia e quindi si è ritenuto più corretto utilizzare le serie senza manipolazioni, procedendo soltanto alla normalizzazione dei dati. La normalizzazione dei dati, conferisce, infatti, un certo grado d'indipendenza dei dati dalla loro stessa intrinseca natura, riducendo il peso di eventuali anomalie ed il rischio d'incoerenza del database, e consente un raffronto di dati diversi, per scala e per campo di variazione, più affidabile. La procedura adottata, ovviamente, non riduce gli errori e le incertezze derivante da serie

incomplete, ma consente di proporre e di analizzare i trend temporali per costruire un quadro di riferimento delle variazioni idrologiche dei fiumi in Italia, come base di partenza e stimolo per studi più approfonditi. Inoltre, come sarà discusso qui di seguito, tutti i parametri di tutti i fiumi considerati mostrano, ad eccezione di pochissimi casi (vedi Tab. 4), andamenti simili confermando la relativa bontà dell'approccio adottato. I valori di precipitazione annua, relativi ai bacini idrografici considerati in questo studio, mostrano per il periodo 1931-2011 una tendenza alla diminuzione che mediamente risulta essere di 2.11 mm l'anno. Questo dato, distribuito sugli 80 anni di osservazione, comporta una perdita di afflusso annuo di circa 169 mm che corrisponde ad una diminuzione media di circa il 18%. I dati di Desiato *et al.* (2015), elaborati per conto di ISPRA, confermano questo stesso andamento per l'intervallo 1951-2014. Questi risultati contrastano però con quanto riportato da Toreti *et al.* (2009) che, invece, non rilevano nessun cambiamento significativo nelle piogge annuali. Questi autori, sebbene abbiano usato 59 stazioni pluviometriche ben distribuite sul territorio italiano, hanno utilizzato dati relativi all'intervallo 1961-2006 che è quasi la metà di quello considerato in questo studio. Anche Norrant & Douguédroit (2006) confermano la mancanza di trend delle precipitazioni annuali nell'area Mediterranea per l'intervallo di tempo compreso tra il 1950 ed il 2000. Trenberth *et al.* (2007), sulla base di serie molto più lunghe a scala Europea, che coprono un intervallo compreso tra il 1900 ed il 2005, indicano invece una significativa diminuzione delle piogge annuali nell'area mediterranea, simile a quella osservata in questo studio. Questo risultato trova conferma, per quanto riguarda l'Italia, nello studio di Brunetti *et al.* (2006) che, utilizzando 75 serie storiche relativamente continue, su un arco di tempo di 120 anni compreso tra il 1865 ed il 2003, trovano un trend negativo. Da ciò si evince facilmente che la lunghezza dell'intervallo considerato ha un ruolo importante nella definizione del segno dei trend osservati e che periodi più lunghi consentono di identificare con maggiore accuratezza la direzione e l'entità del cambiamento, anche se serie troppo lunghe, ma non è questo il caso in questione, possono presentare fluttuazioni climatiche che comunque possono essere considerate come oscillazioni attorno ad una tendenza centrale (WMO, 1988).

In un contesto generale di diminuzione delle piogge annuali, non stupisce quindi che anche i deflussi mostrino un trend negativo, che mediamente è di 2.65 mm l'anno. Questo tasso di diminuzione dei deflussi è però maggiore di quello degli afflussi ed indica che, nel periodo di riferimento, altri fattori si sono aggiunti alla diminuzione delle piogge. Questi fattori non sono facilmente identificabili, ed ancora meno quantificabili, ma si può presumere che un aumento dei prelievi

per vari scopi (principalmente irriguo, industriale ed in misura molto minore per uso idropotabile) osservato in Italia come in altri paesi industrializzati (Gleick, 2002) ed un sostanziale cambiamento dell'uso del suolo e della copertura vegetale possano aver svolto un ruolo importante. Falcucci *et al.* (2007) riportano infatti, per il periodo 1960-2000, quasi un consistente aumento dell'estensione delle foreste, dal 18.7% al 32.5%, specialmente nelle aree montane, un dimezzamento della superficie a prato/pascolo (da 18.7 a 9.2%), un aumento delle aree urbanizzate ed una limitata diminuzione delle aree coltivate. Questo andamento della copertura vegetale è confermato anche da ISPRA (2010), sebbene su un arco di tempo minore compreso tra il 1990 ed il 2000.

I dati di Falcucci *et al.* (2007) ci dicono che l'incremento delle coperture boschive, con il conseguente aumento dell'evapotraspirazione, può aver contribuito sostanzialmente alla diminuzione dei deflussi (Riekerk, 1989), anche se non si può trascurare la costante crescita dei prelievi d'acqua, sia per scopi irrigui (50%) che idropotabili (19%) ed industriali (17%) che si è registrata in Italia, come nella maggior parte dei paesi industrializzati, negli ultimi decenni (OECD, 2013). La diminuzione delle portate massime giornaliere è in linea con quanto osservato per le precipitazioni e questo sembrerebbe apparentemente in contrasto con la frequenza di eventi alluvionali che si sono succeduti negli ultimi due decenni in tutta Italia (Fig. 19) e la cui frequenza sembra essere aumentata. Nanni *et al.* (2007) hanno analizzato le piogge giornaliere in Italia per il periodo 1880-2002 ed hanno rilevato un aumento della frequenza degli eventi di forte intensità solo in alcune sotto-regioni dell'Italia settentrionale ed osservano che, soprattutto nell'Italia peninsulare, si registra una diminuzione dei giorni piovosi più che un vero e proprio aumento dei giorni con piogge intense. Per capire meglio questa apparente contraddizione in termini di portate massime bisogna considerare che i dati di pioggia giornalieri spesso non sono indicativi nel determinare picchi di piena molto elevati e con tempi di ritorno molto lunghi e che intensità di pioggia con valori orari e tri-orari mai registrati prima sono divenuti assai comuni negli ultimi anni in Italia. Queste piogge brevi sono la causa scatenante di quelli che comunemente sono conosciuti come alluvioni lampo (traduzione dall'Inglese di "*flash floods*") e che, nella maggior parte dei casi, sono originati da piogge molto intense, ma arealmente molto circoscritte, che hanno interessato sistemi fluviali molto piccoli con un bacino idrografico non più grande di qualche centinaio di chilometri quadrati.

La portata superata 10 giorni l'anno è quella che mostra il più basso tasso medio di variazione. Questo dato vale non solo per quelle stazioni idrometriche poste a valle di bacini artificiali, per i quali è facile invocare



Fig. 19 - Distribuzione delle alluvioni lampo ("*flash floods*") in Italia negli ultimi due decenni.

il regime di gestione della portate come più probabile elemento regolatore della  $Q_{10g}$ , ma anche per fiumi privi di interventi antropici come dighe o derivazioni. L'andamento di questo parametro è probabilmente controllato dalla diminuzione del numero dei giorni piovosi che in parte controbilancia la conseguente crescita dell'intensità, come osservato da Nanni *et al.* (2007).

## CONCLUSIONI

In un quadro planetario di cambiamento climatico ed impatto umano sul ciclo idrologico, oramai accettato dalla maggior parte dei ricercatori, non è presente uno studio sulla risposta idrologica dei corsi d'acqua italiani. I fiumi rappresentano un'insostituibile risorsa idrica ed un importante ecosistema di grande valore, soprattutto per i paesi industrializzati come l'Italia e molti altri nel resto del mondo. Non è quindi possibile prescindere da una conoscenza approfondita di come questa fondamentale risorsa idrica si sia modificata nel tempo al fine di predisporre adeguate misure di salvaguardia. In questo studio sono stati presi in considerazione diversi fiumi italiani e sono stati raccolti i principali dati idrologici di 23 stazioni idrometriche. I parametri considerati sono stati gli afflussi annui, i deflussi annui, il coefficiente di deflusso annuo, la portata massima gior-

naliera e la portata superata 10 giorni l'anno. Inoltre è stato ricavato un modello correlativo di stima delle portate di picco che è stato utilizzato per calcolare la portata formativa, ovvero la portata della piena più frequente che nella distribuzione di Gumbel corrisponde a quella con un tempo di ritorno di 1.58 anni.

L'analisi delle serie temporali di tutti questi parametri mostra dei trend negativi per tutti i fiumi ad eccezione del Po, che per un paio di parametri mostra invece tendenze positive. I dati di tutti i parametri per tutti i fiumi considerati sono stati normalizzati attraverso la variabile  $z$  e sono state ottenute cinque serie costituite dai valori medi di  $z$  per un intervallo di tempo compreso tra il 1931 ed il 2011. Anche queste serie, che possiamo considerare come rappresentative di tutto il territorio italiano, mostrano chiaramente dei trend negativi. Questi risultati definiscono quindi per l'Italia un quadro di riduzione generalizzata delle risorse idriche che si caratterizza per una diminuzione delle piogge ed una più consistente diminuzione dei deflussi. Quest'ultimo risultato può essere spiegato con un crescente sfruttamento delle acque fluviali per scopi irrigui ed industriali, associato ad un significativo aumento della copertura boschiva che, attraverso un importante incremento dell'evapotraspirazione, contribuisce sostanzialmente ad una riduzione della disponibilità idrica potenziale dei fiumi.

Infine sono stati ottenuti diversi modelli lineari di correlazione tra l'area del bacino sotteso ed i principali parametri idraulici: portata massima, portata superata 10 giorni l'anno, portata formativa con tempo di ritorno di 1.58 anni e portata massima osservata. Secondo questi modelli l'area del bacino controlla tra l'85 ed il 99% della variabilità di questi parametri che possono quindi essere stimati con un elevato grado di affidabilità per quei corsi d'acqua in cui non sono presenti dati idrologici oppure le serie storiche dei dati sono troppo brevi o troppo discontinue.

## BIBLIOGRAFIA

- ANDREWS E.D., 1980. Effective and bankfull discharges of streams in the Yampa River Basin, Colorado and Wyoming. *Journal of Hydrology* 46, 311-330.
- BARNETT T.P., ADAM J.C., LETTENMAIER D.P., 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature* 438: 303-309.
- BILLI P., ALEMU Y., CIAMPALINI R., 2015. Increased frequency of flash floods in Dire Dawa, Ethiopia: change in rainfall intensity or human impact? *Natural Hazards* 76 (2), 1373-1394.
- BINDER L.C.W., 2006. Climate change and watershed planning in Washington State. *Journal of the American Water Resources Association* 42: 915-926.
- BORDI I., FRAEDRICH K., SUTERA A., 2009. Observed drought and wetness trends in Europe: an update. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 1519-1530.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., MONTI F., NANNI T., 2006. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal of Climatology* 26: 345-381.
- CHIEW F.H.S., MCMAHON T.A., 2002. Global ENSO-streamflow teleconnections-streamflow forecasting and interannual variability. *Hydrological Sciences Journal* 47: 505-522.
- DAI A., QIAN T., TRENBERTH K.E., MILLIMAN J., 2009. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004. *Journal of Climate* 22: 2773-2792.
- DERY S.J., STIEGLITZ M., MCKENNA E.C., WOOD E.F., 2005. Characteristics and trends of river discharge into Hudson, James, and Ungava bays, 1964-2000. *Journal of Climate* 18: 2540-2557.
- DESIATO F., FIORAVANTI G., FRASCHETTI P., PIERVITALI E., PAVAN V., 2015. Gli indicatori del clima in Italia nel 2014. Stato dell'Ambiente 57/2015, ISPRA, 68. Roma
- DOLL P., FIEDLER K., ZHANG J., 2009. Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 2413-2432.
- EEA European Environment Agency, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. EEA Report No 12/2012, 300 pp.
- FALCUCCI A., MAIORANO L., BOITANI L., 2007. Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation. *Landscape Ecology* 22: 617-631.
- FU G.B., BARBER M.E., CHEN S.L., 2009. Hydro-climatic variability and trends in Washington State for the last 50 years. *Hydrological Processes* 24: 866-878.
- GLEICK P.H., 2002. Water management: Soft water paths. *Nature* 418: 373.
- GOSLING S.N., TAYLOR, R.G., ARNELL N.W., TODD M.C., 2011. A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 279-294.
- HANNAH D.M., DEMUTH S., VAN LANEN H.A.J., LOOSER U., PRUDHOMME C., REES G., STHAL K., TALLAKSEN L.M., 2011. Large-scale river flow archives: importance, current status and future needs. *Hydrological Processes* 25: 1191-1200.
- HARVEY C.L., DIXON H., HANNAFORD J., 2010. Developing best practice for infilling daily river flow data. BHS Third International Symposium, Managing Consequences of a Changing Global Environment, Newcastle, British Hydrological Society, 816-823.
- ISPRA, 2010. Analisi conclusive relative alla cartografia Corine Land Cover 2000. Rapporto 130/210, ISPRA 117. Roma
- LEOPOLD L.B., WOLMAN M.G., MILLER J.P., 1964. Fluvial processes in geomorphology. Freeman, San Francisco.
- MARIANI L., 2006. Alcuni metodi per l'analisi delle serie storiche in agrometeorologia. *Rivista Italiana di Agrometeorologia* 2: 48-56.
- MARSH T.J., 2002. Capitalising on river flow data to meet changing national needs-a UK perspective. *Flow Measurement and Instrumentation* 13: 291-298.
- NANNI T., BRUNETTI M., MAUGERI M., 2007. Variazioni nella frequenza e nell'intensità delle precipitazioni giornaliere in Italia negli ultimi 120 anni. In: Carli B., Cavarretta G., Colacino M., Fuzzi S. (eds) Clima e Cambiamenti Climatici - Le attività di Ricerca del CNR, Roma: Consiglio Nazionale delle Ricerche.

- NOHARA D., KITO H., HOSAKA M., OKI T., 2006. Impact of climate change on river discharge projected by multimodel ensemble. *Journal of Hydrometeorology* 7: 1076-1089.
- NORRANT C., DOUGUÉDROIT A. 2006. Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950-2000). *Theoretical and Applied Climatology* 83: 89-106.
- OECD, 2013. Rapporti dell'OCSE sulle performance ambientali: Italia. OECD Publishing, 226. Parigi.
- PICKUP G., WARNER R.F., 1976. Effects of hydrologic regime on magnitude and frequency of dominant discharge. *Journal of Hydrology* 2 (9): 51-75.
- POWELL M.D., REID I., LARONNE J.B., 2001. Evolution of bedload grain size distribution with increasing flow strength and the effect of flow duration on the caliber of bed load sediment yield in ephemeral gravel bed rivers. *Water Resources Research* 37(5): 1463-1474.
- PRECISO E., SALEMI E., BILLI P., 2012. Land use changes, torrent control works and sediment mining: effects on channel morphology and sediment flux, case study of the Reno River (Northern Italy). *Hydrological Processes* 26 (8): 1134-1148.
- RIEKERK H., 1989. Influence of silvicultural practices on the hydrology of pine flatwoods in Florida. *Water Resources Research* 25(4): 713-719.
- ROJAS R., FEYEN L., BIANCHI A., DOSIO A., 2012. Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of corrected regional climate simulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117: 1984-2012.
- SIMONETTO A., 2011. Caratteristiche morfologiche di alcuni fiumi ghiaiosi antropizzati e naturali e studio della stabilità del Fiume Brenta tra Bassano e Carturo. Tesi di Laurea inedita, Università di Padova.
- STAHL K., HISDAL H., HANNAFORD J., TALLAKSEN L.M., VAN LANEN H.A.J., SAUQUET E., DEMUTH S., FENDEKOVA M., JODAR J., 2010. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 2367-2382.
- TORETI A., FIORAVANTI G., PERCONTIA W., DESIATO F., 2009. Annual and seasonal precipitation over Italy from 1961 to 2006. *International Journal of Climatology* 29: 1976-1987.
- TORIZZO M., PITLICK J., 2004. Magnitude-frequency of bed load transport in mountain streams in Colorado. *Journal of Hydrology* 290: 137-151.
- TRENBERTH K.E., JONES P.D., AMBENJE P., BOJARIU R., EASTERLING D., KLEIN TANK A., PARKER D., RAHIMZADEH F., RENWICK J.A., RUSTICUCCI M., SODEN B., ZHAI P., 2007. Observations: surface and atmospheric climate change. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge.
- VOGL A.L., LOPES V.L., 2009. Impact of water resources development on flow regimes in the Brazos River. *Environment Monitoring Assessment* 157: 331-345.
- WMO, 1988. Analyzing long time series of hydrological data with respect to climate variability. WMO/TD report No. 224, World Meteorological Organization, 41. Geneva.

(ms. pres. 20 gennaio 2016; ult. bozze 29 maggio 2016)



Edizioni ETS  
Piazza Carrara, 16-19, I-56126 Pisa  
info@edizioniets.com - www.edizioniets.com  
Finito di stampare nel mese di marzo 2017