

P. Claps, F. Rossi

**Impiego di un modello stocastico a base
concettuale per lo studio delle magre
dei corsi d'acqua**



ATTI DEL
**XXII CONVEGNO
DI IDRAULICA
E COSTRUZIONI
IDRAULICHE**
COSENZA, 4-7 OTTOBRE 1990

DIPARTIMENTO DI DIFESA DEL SUOLO
UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

EDITORIALE BIOS

Impiego di un modello stocastico a base concettuale per lo studio delle magre dei corsi d'acqua*

Pierluigi Claps

Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Università della Basilicata
Via della Tecnica 3 - Potenza

Fabio Rossi

Istituto di Ingegneria Civile, Università di Salerno
Penta di Fisciano (SA)

SOMMARIO

Nei bacini italiani appenninici, nei quali si può trascurare l'apporto dovuto allo scioglimento delle nevi, il deflusso mensile può considerarsi originato da tre contributi: il deflusso delle falde ad esaurimento pluriennale, quello delle falde ad esaurimento stagionale ed il deflusso diretto. I deflussi di magra sono quindi costituiti dal minimo annuo della somma dei deflussi di falda, potendosi considerare nullo l'apporto di deflusso diretto.

Per riprodurre statisticamente il processo dei minimi del deflusso mensile si propone una tecnica di simulazione basata su un modello stocastico derivato da un modello concettuale dei deflussi. Lo scopo è la valutazione degli effetti di diverse componenti di deflusso di falda nei riguardi della distribuzione di frequenza del minimo annuo del deflusso mensile.

ABSTRACT

In Italian basins with negligible snowmelt runoff, the streamflow process at monthly scale can be considered as the sum of three contributions: the groundwater runoff with pluriannual persistence, the groundwater runoff with seasonal persistence and the direct runoff. Since the direct runoff can be neglected in the dry season, droughts turn out to be the annual minima of the sum of the remaining two processes. In order to reproduce drought periods on monthly basis, a simulation technique is here proposed, which makes use of a stochastic model based on a conceptual model of runoff. The aim is to evaluate the effects of different groundwater runoff components upon the frequency distribution of the annual minima of the monthly runoff.

*Ricerca finanziata dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (Fondo CNR 88.00969.42)

1. INTRODUZIONE

1.1 Finalità

Nelle diverse fasi di pianificazione e gestione dei sistemi idrici riveste notevole interesse ingegneristico l'impatto delle siccità, intese come lunghi periodi di assenza di precipitazioni, sulle magre dei corsi d'acqua.

Per valutare la severità di un periodo di magra fluviale occorre riferirsi agli effetti che essa esercita sul sistema idrico e particolarmente:

- alla durata critica del periodo di deficit
- alla probabilità di rischio di deficit idrico
- alla entità del massimo deficit cumulato nel periodo

La durata del periodo di deficit dipende fortemente dal grado di utilizzazione dei deflussi e quindi dalla tipologia dell'opera di derivazione. Si passa infatti da una durata mensile per gli impianti a deflusso, ad una durata stagionale del deficit per i piccoli serbatoi a compenso stagionale, ad una durata pluriennale per i grandi serbatoi a compenso pluriennale.

La probabilità e l'entità del deficit dipendono quindi dai valori minimi dei deflussi mensili, stagionali o pluriennali a seconda delle caratteristiche del sistema idrico.

Un modello di previsione dei deflussi di magra deve quindi essere capace di riprodurre la distribuzione di probabilità di detti valori minimi dei deflussi a diversa scala di aggregazione temporale.

Le difficoltà di modellazione matematica del fenomeno derivano dal fatto che tali valori minimi dipendono da una parte dalla variabilità delle precipitazioni, sia di tipo climatico stagionale sia di tipo aleatorio, dall'altra dalle diverse scale temporali di persistenza dovute agli invasi del bacino.

Ad esempio, nei bacini appenninici i valori minimi dei deflussi mensili dipendono essenzialmente dai contributi di falde profonde a persistenza pluriennale, i valori minimi dei deflussi stagionali dipendono dai contributi di falde "superficiali" a persistenza stagionale, mentre i valori minimi dei deflussi pluriennali dipendono essenzialmente dai contributi di deflusso diretto.

1.2 Metodologia adottata

L'usuale approccio statistico ai problemi di minimo dei deflussi fluviali è di tipo esclusivamente empirico, nel senso che consiste nella ricerca di leggi di distribuzione di probabilità che presentino il migliore adattamento rispetto ai dati in relazione all'indice idrologico che interessa. Tra gli indici statistici che di solito si considerano vi sono, oltre alle strutture di autocorrelazione ed ai momenti delle serie, le distribuzioni di probabilità dei minimi in diversi periodi di tempo, la distribuzione delle lunghezze dei periodi in cui il deflusso è inferiore alla media ("RUN"), il deficit in questi periodi (si veda ad esempio [2])

I modelli empirici sono di norma selezionati in base a tests di tipo statistico (parsimonia dei parametri, bontà di adattamento, ecc.) e non incorporano praticamente alcun meccanismo fisico nella descrizione statistica.

Questi dati di fatto comportano che non ci si possa attendere di riprodurre caratteristiche dei deflussi minimi che non siano strettamente connesse all'indice preso in considerazione; inoltre in presenza di serie

storiche brevi risulta elevata l'incertezza sul grado di affidabilità della stima e delle previsioni. Peraltro, nella pratica si ritrovano molto frequentemente serie storiche brevi rispetto ai periodi di ritorno richiesti nelle fasi di pianificazione.

In definitiva, l'efficienza delle metodologie statistiche empiriche non risulta soddisfacente nei riguardi dei requisiti che sono richiesti ai modelli di previsione. Per superare gli inconvenienti dei modelli statistici empirici è necessario far intervenire nella simulazione meccanismi di tipo fisico, tra i quali sono di importanza fondamentale gli effetti esercitati sui deflussi dalle falde sotterranee, come sottolineato da Beran [3].

Impiegando modelli fisicamente basati è possibile tener conto di informazioni a priori sul fenomeno fin dalla fase di identificazione e tali informazioni possono essere adoperate successivamente per controllare l'affidabilità delle stime e delle previsioni. Inoltre, l'impiego di modelli fisicamente basati consente di aumentare l'efficienza delle stime attraverso criteri di regionalizzazione.

Esistono diversi modi di affrontare lo studio delle magre con metodologie a base fisica.

Un approccio è basato sull'uso di modelli deterministici afflussi-deflussi di tipo concettuale a simulazione continua. In tali modelli la struttura viene identificata a partire dalle caratteristiche fisiche del fenomeno. Tuttavia, la stima dei parametri, che viene effettuata simultaneamente a breve scala temporale, risulta spesso praticamente impossibile da ottenere con accettabile efficienza con i dati a disposizione. Per di più, tecniche oggettive di valutazione della reale identificabilità di modelli, di solito troppo complessi e con numero troppo elevato di parametri, vengono usate solo a livello di ricerca [7] e non nella pratica tecnica.

Un approccio alternativo, che può essere definito "statistico-fisicamente basato" unisce i vantaggi dei metodi statistici a quelli dei modelli deterministici fisicamente basati. Ad esempio, Gottschalk & Perzyna [5] partendo da una schematizzazione concettuale del fenomeno hanno ricavato una distribuzione di probabilità per il minimo annuo della portata giornaliera o di più giorni, che ha la forma della distribuzione di Weibull (EV3). I due autori ipotizzano che i minimi derivino interamente dal deflusso di falda e quindi corrispondano ai valori della portata in uscita dall'invaso di falda al termine dei periodi secchi, valori calcolati con legge di esaurimento esponenziale decrescente. L'esponente della legge di esaurimento dell'invaso e la portata all'inizio dei periodi secchi vengono considerati costanti, per cui il minimo annuo della portata giornaliera corrisponde al massimo annuo della durata dei periodi secchi. La distribuzione di probabilità del minimo viene ottenuta ipotizzando che il massimo annuo della durata dei periodi senza pioggia segua la legge di distribuzione di Gumbel (EV1). Questa impostazione, pur costituendo un interessante tentativo di fornire basi fenomenologiche all'approccio statistico, non conduce a risultati soddisfacenti, confermando quanto riscontrato da Waylen & Woo [8] sulla inadeguatezza della distribuzione di Weibull.

L'approccio che si suggerisce per lo studio delle magre dei corsi d'acqua prevede invece l'impiego di una metodologia stocastica a base concettuale, proposta dal primo autore nella tesi di Dottorato [4], finalizzata all'interpretazione dell'intero processo dei deflussi a diverse scale temporali.

Nel presente lavoro, al fine di riprodurre la distribuzione di probabilità dei deflussi minimi, la metodologia si specializza con il ricorso ad una tecnica di simulazione (generazione di serie sintetiche).

2. MODELLO STOCASTICO A BASE CONCETTUALE DEI DEFLUSSI MENSILI

Il principio su cui si basa la metodologia proposta è quello di identificare nel processo dei deflussi strutture concettuali caratteristiche di ogni scala temporale ed incorporarle nel modello stocastico. Attraverso il modello stocastico si stimano i parametri di tali elementi concettuali, così che si può determinarne gli effetti alle scale temporali inferiori.

Il modello stocastico così identificato è quindi in grado di riprodurre il processo dei deflussi, ed in particolare le caratteristiche di persistenza, a diverse scale temporali.

L'identificazione delle suddette strutture concettuali avviene attraverso l'osservazione delle serie temporali dei deflussi a scale di aggregazione diverse, isolando contributi, con caratteristiche diverse, che inducono persistenza.

Il modello concettuale proposto è finalizzato alla rappresentazione del processo dei deflussi mensili e viene qui descritto sinteticamente. Esso si basa sull'assunzione che, in bacini in cui si possa trascurare l'apporto dovuto allo scioglimento delle nevi, i deflussi su base mensile possano considerarsi determinati dalla somma di tre contributi.

Il primo è quello proveniente dalle falde profonde ad esaurimento pluriennale, presenti per lo più all'interno dei grandi massicci carbonatici permeabili per fratturazione.

Il secondo apporto viene dai volumi invasati nelle falde ad esaurimento stagionale (plurimensile), contributo che diventa trascurabile alla fine della stagione secca.

La terza componente è costituita dai volumi aventi ritardo sub-mensile rispetto alle precipitazioni, unificabili sotto la definizione "deflusso diretto a scala mensile". Esso è considerato proporzionale all'afflusso netto o efficace, e quindi rappresenta una componente aleatoria con parametri a variabilità stagionale.

Assumendo che le falde si comportino come degli invasi lineari, il deflusso si può considerare come l'uscita di un sistema lineare il cui ingresso rappresenta la precipitazione netta. L'afflusso netto si considera ripartito tra la falda ad invaso profondo, la falda stagionale e la rete idrografica, con proporzioni fisse da mese a mese. Le percentuali di input netto I_t che competono alle due falde (coefficienti a e b di ricarica) costituiscono due dei coefficienti del modello concettuale.

Il deflusso mensile risulta così prodotto da un sistema lineare costituito da due invasi in parallelo più un elemento di traslazione senza ritardo, i cui parametri sono caratteristici degli acquiferi: due riguardano, come detto, le caratteristiche di ricarica e due quelle di esaurimento (le costanti c_k e c_q che hanno rispettivamente espressione: $(1 - e^{-t/k})$ e $(1 - e^{-t/q})$ dove k e q sono le costanti d'invaso). Il deflusso in uscita dagli invasi di falda alla fine di ogni intervallo t , per l'ipotesi di linearità, è pari rispettivamente a $c_k V_t$ e $c_q W_t$ dove V_t e W_t sono i volumi invasati all'inizio dell'intervallo.

Scrivendo le equazioni del bilancio di volume per i due invasi e per l'intero sistema, ci si riconduce ad una forma matematica corrispondente ad un modello stocastico lineare ARMA(2,2) (autoregressivo di ordine 2 e media mobile di ordine 2), con 4 parametri, costanti da mese a mese, proporzionali ai coefficienti del modello concettuale.

Il residuo aleatorio del modello stocastico corrisponde al deflusso diretto ed è di tipo pseudo-periodico, cioè contiene una componente periodica di tipo non strettamente deterministico.

Nel caso in cui venga a mancare o sia trascurabile l'apporto della falda pluriennale, il modello ARMA (2,2) si riduce a un modello ARMA (1,1), con i due coefficienti corrispondenti ai parametri della falda stagionale.

Essendo i parametri del modello concettuale e del modello stocastico in relazione diretta, il modello stocastico costituisce la struttura statistica attraverso la quale si possono stimare i parametri concettuali.

Attraverso il modello stocastico ARMA(2,2) non risulta tuttavia possibile effettuare contemporaneamente la stima dei parametri concettuali delle due falde [4]. Ci si riconduce pertanto ad un modello concettuale costituito da un sistema lineare più complesso.

Si segue infatti il concetto di stimare i parametri concettuali alla scala temporale caratteristica di ogni falda.

Sulla serie dei deflussi a scala di aggregazione annua si procede alla stima dei parametri della falda ad esaurimento pluriennale con il modello ARMA(1,1) [6] e con le corrispondenti relazioni tra parametri concettuali e stocastici [4]. In questo modo, passando alla scala temporale mensile è possibile quantificare l'effetto esercitato dalla falda pluriennale su un input netto in ingresso al bacino.

Alla scala di aggregazione mensile il sistema lineare viene suddiviso in due sistemi in parallelo, dei quali quello costituito dal solo invaso profondo ha caratteristiche note, mentre sono da stimare i soli parametri b' e c_q del "sottosistema stagionale", costituito dalla falda ad esaurimento stagionale e dalla traslazione senza ritardo che produce il deflusso diretto (fig. 1).

Al sottosistema stagionale corrisponde ancora un modello stocastico ARMA(1,1), ma con residuo di tipo pseudo-periodico.

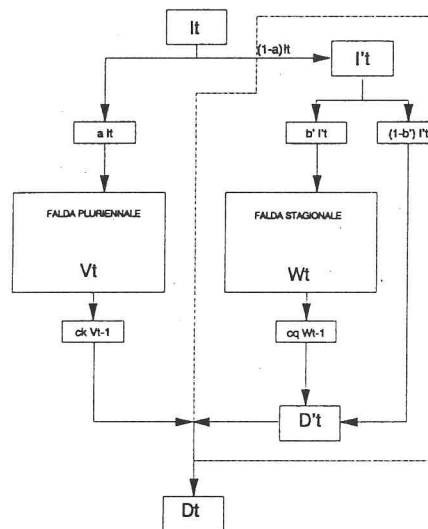


Fig. 1 - Modello concettuale dei deflussi mensili.

La serie storica del deflusso di tale sottosistema è ottenibile solo separando il contributo della falda pluriennale dal deflusso mensile totale. Tale separazione si realizza all'interno del procedimento di stima dei parametri del modello concettuale, ed è di tipo iterativo [4] in quanto

il contributo su base mensile della falda ad esaurimento pluriennale non è noto a priori.

Dalla serie dei deflussi del sottosistema stagionale si possono stimare [4] sia i due parametri caratteristici della falda stagionale, sia il residuo aleatorio che rappresenta il deflusso diretto, o, a meno di una costante di proporzionalità, l'afflusso netto.

I presupposti concettuali che sono alla base del modello stocastico, portando a considerare un residuo pseudo-periodico, consentono di concentrare la variabilità mensile del processo nel fattore climatico, cioè nell'input netto, piuttosto che rimuoverle preventivamente con una destagionalizzazione o concentrarla nei parametri, come avviene con i modelli a parametri variabili.

3. DISTRIBUZIONE DI PROBABILITA' DELL'INPUT NETTO STIMATO

Come detto in precedenza, il modello concettuale del deflusso mensile è costituito da un sistema lineare la cui uscita è appunto il deflusso, mentre l'ingresso è costituito dall'afflusso netto. Le serie di dati che si considerano sono però solo quelle dei deflussi.

Infatti, la metodologia in esame è sviluppata nell'ambito dei modelli stocastici univariati, quali sono i modelli ARMA a parametri costanti. L'afflusso netto è perciò stimato dalla serie dei residui del modello facendo uso del significato concettuale dei parametri stocastici. Per questo motivo si preferisce denominare l'ingresso al sistema "input netto" piuttosto che afflusso netto. Questa quantità, per di più è da ricavarsi dalla serie del residuo estraendo una componente puramente aleatoria di errore, per cui si parlerà di "input netto stimato".

L'input netto stimato è una variabile casuale che presenta nei mesi della stagione secca un numero significativo di valori zero, sicché vi sono difficoltà ad analizzarlo con i classici modelli probabilistici di tipo continuo. Si è quindi impiegato un modello probabilistico a due parametri, di tipo composto, definito dalla somma di un numero di eventi distribuito con legge Poissoniana di parametro n , ognuno con intensità distribuita con legge esponenziale di parametro L [1].

La densità di probabilità che si ottiene con la mistura Poisson-Exponenziale ha espressione (con X = input netto mensile):

$$P[x=0] = e^{-n} \quad (\text{probabilità finita per } x=0)$$

$$f_X(x) = e^{-Lx-n} \sum_{u=0}^{\infty} \frac{(nL)^{u+1} x^u}{u! \Gamma(u+2)} \quad (1)$$

oppure, in forma di funzione:

$$f_X(x) = e^{-Lx-n} \sqrt{nL/x} I_1(2\sqrt{Lxn}) \quad (2)$$

dove $I_1(x)$ è la funzione di Bessel modificata di ordine 1.

Le relazioni tra i momenti campionari, che chiamiamo per semplicità μ e σ , e quelli della distribuzione sono:

$$\mu_X = n/L \quad \sigma_X^2 = 2n/L^2 \quad (3)$$

Poiché il parametro esponenziale è espresso in mm^{-1} è preferibile riferirsi al suo inverso, $B = 1/L$.

Le stime di n e β con il metodo dei momenti sono pertanto:

$$n = 2/Cv^2 \qquad \beta = \sigma_X^2 / 2\mu_X \qquad (4)$$

con Cv = coefficiente di variazione di X . I due parametri vengono stimati da ogni singola serie di dati, mese per mese.

Potendosi dare all'input netto un significato di variabile climatica, risulta altresì possibile impiegare criteri di similitudine idrologica per l'individuazione di parametri costanti su base regionale e caratteristici del fenomeno.

Nel passare da un corso d'acqua all'altro, in una stessa regione climatica, e' risultata infatti costante la legge di variabilità stagionale del rapporto fra media mensile e media annua dell'afflusso netto fig. 2.

Inoltre, il prodotto $\beta \cdot r \cdot n^{(1/2-r)}$, con $r=0.16$, è costante su base regionale non solo da un corso d'acqua all'altro, ma anche da mese a mese nello stesso corso d'acqua.

Il fatto che l'andamento della media campionaria all'interno dell'anno sia stabile in una regione climatica molto ampia, per cui può essere rappresentata attraverso una funzione periodica, consente di ridurre significativamente il numero di parametri da stimare per la distribuzione di probabilita' e, soprattutto, costituisce una importante base di partenza ai fini della applicazione della metodologia proposta a bacini privi di stazioni di misura.

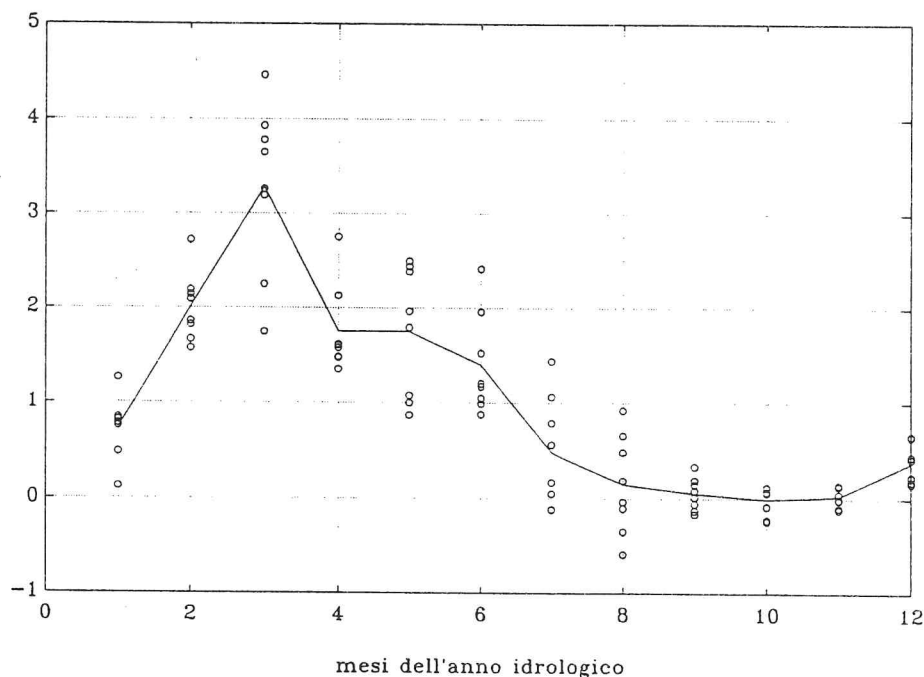


Fig. 2 - Medie regionali dell'input netto nei diversi mesi dell'anno.

4. GENERAZIONE DI SERIE SINTETICHE

La procedura di generazione di serie sintetiche di deflussi mensili si realizza generando sequenze di valori di input netto secondo il modello probabilistico descritto in precedenza, sequenze che costituiscono l'ingresso al sistema lineare. La variabile in uscita dal sistema è ottenuta applicando l'equazione di continuità dell'invaso lineare alle due

falde, separando gli ingressi nelle frazioni a e b , parametri del modello concettuale.

La tecnica di generazione dei deflussi attraverso il modello stocastico proposto non differisce nella sostanza dalla tecnica standard adottata con le metodologie statistiche di tipo empirico, se non per il fatto che vengono generate variabili casuali di input netto invece che di residuo.

La differenza sostanziale che il modello a base concettuale comporta rispetto ai modelli empirici sta nel fatto che il deflusso generato è determinato dalla somma di due componenti riprodotte separatamente, derivanti appunto dai due elementi di invaso lineare. Si riesce in questo modo ad ottenere le serie sintetiche dei deflussi di ognuna delle falde.

La generazione di input netti sintetici si realizza in base alla definizione stessa della distribuzione di probabilità, attraverso la somma di un numero poissoniano di eventi distribuiti esponenzialmente, con valori dei parametri n e β variabili da mese a mese.

5. DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ DEI DEFLUSSI MINIMI

Il modello descritto precedentemente è stato usato per determinare la distribuzione di probabilità dei deflussi mensili minimi.

La tecnica adottata consiste in una simulazione ottenuta mediante generazione di serie sintetiche di deflussi mensili. Le serie generate costituiscono la base da cui derivare la distribuzione di probabilità teorica dei deflussi di ogni mese dell'anno e quella del minimo annuo del deflusso mensile. Si può, in tal modo, verificare la capacità da parte del modello stocastico di riprodurre le relative distribuzioni di frequenza del campione osservato. Va rimarcato che, in generale, la capacità da parte di un modello di riprodurre il processo stocastico di una grandezza non implica la capacità di riprodurre quella del minimo della stessa variabile.

Nella metodologia proposta, la distribuzione di probabilità dei minimi si ottiene dalla descrizione dell'intero processo dei deflussi. I parametri del modello stocastico sono perciò stimati su tutti i dati della serie e non solo sui valori corrispondenti a periodi di magra, come di solito avviene con gli approcci statistici di tipo empirico e come suggerito da Gottschalk & Perzyna.

Rispetto all'approccio degli autori appena citati, la metodologia in esame presenta importanti differenze:

1. non è limitata da ipotesi drasticamente semplificative, quale ad esempio l'assunzione di costanza della portata all'inizio del periodo di siccità
2. il minimo annuo del deflusso mensile si considera originato dai contributi di due falde, le cui caratteristiche sono stimate sull'intera serie dei deflussi, invece che dall'esaurimento di un generico invaso lineare.

6. APPLICAZIONE

Il modello stocastico dei deflussi mensili è stato applicato ad 8 serie storiche di deflussi relativi a corsi d'acqua appenninici (di cui 3 con rilevante apporto di falda pluriennale) accuratamente selezionati in base a criteri di omogeneità [4]. La procedura di simulazione (metodo Monte-Carlo) è stata applicata alla serie storica dei deflussi del Tevere a Roma, adoperando i parametri campionari della distribuzione di probabilità dell'input netto piuttosto che quelli regionali.

La tecnica di simulazione è stata applicata generando una serie di lunghezza pari a 100 volte quella del campione osservato, per un totale di 5000 dati per ogni mese dell'anno. Le frequenze cumulate ottenute dal campione generato sono considerate distribuzioni di probabilità teoriche.

L'adattamento di tali distribuzioni teoriche ai dati osservati è stato verificato:

- per il deflusso annuo, ottenuto dall'aggregazione dei dati mensili (fig. 3), riportato in carta normale delle radici cubiche;
- per il deflusso mensile (in fig. 4 è riportata, sempre in carta normale delle radici cubiche, la curva del mese di settembre);
- per il minimo annuo del deflusso mensile (in fig. 5 la curva è riportata in carta Log-Gumbel a tratto continuo).

In fig. 5 è riportata inoltre, a tratto e punto, la curva teorica di distribuzione di probabilità dei minimi del deflusso di falda profonda. Come si può osservare, i minimi sono dovuti essenzialmente al contributo della falda profonda e secondariamente a quello della falda stagionale.

L'osservazione dell'adattamento tra il campione osservato e la curva ottenuta dai minimi annui della serie generata richiede alcuni commenti.

La curva teorica di distribuzione di probabilità dei minimi non si dispone su di una retta in carta Log-Gumbel e quindi non conferma l'ipotesi di distribuzione di probabilità di Weibull indicata da Gottschalk & Perzyna. Questo scostamento deriva essenzialmente da due circostanze:

Una si riconduce alla presenza della falda ad esaurimento stagionale, la quale porta in molti anni un contributo non trascurabile ai valori minimi anche alla fine della stagione secca.

Una seconda è connessa allo scostamento dall'andamento rettilineo che si osserva anche per i deflussi minimi alimentati da una sola falda (curva a tratto e punto di fig. 5), schema che corrisponde all'ipotesi di Gottschalk & Perzyna. Una spiegazione del mancato adattamento della distribuzione di Weibull anche in questo secondo caso può risiedere nell'eccessiva semplificazione adottata dai citati autori nel considerare costante la portata all'inizio dei periodi secchi.

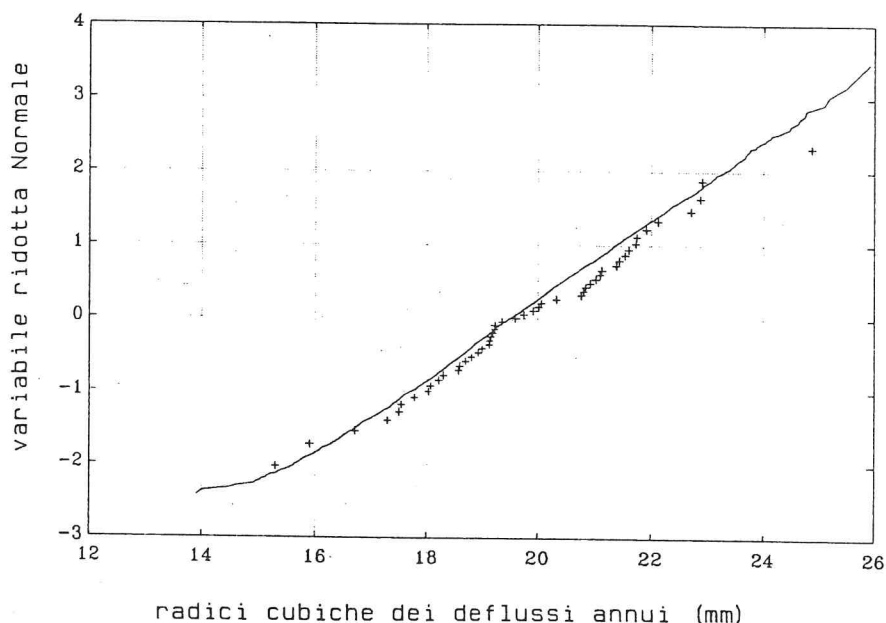


Fig. 3 - Tevere a Roma: Adattamento dei dati di deflusso annuo alla distribuzione di probabilità ottenuta per simulazione.

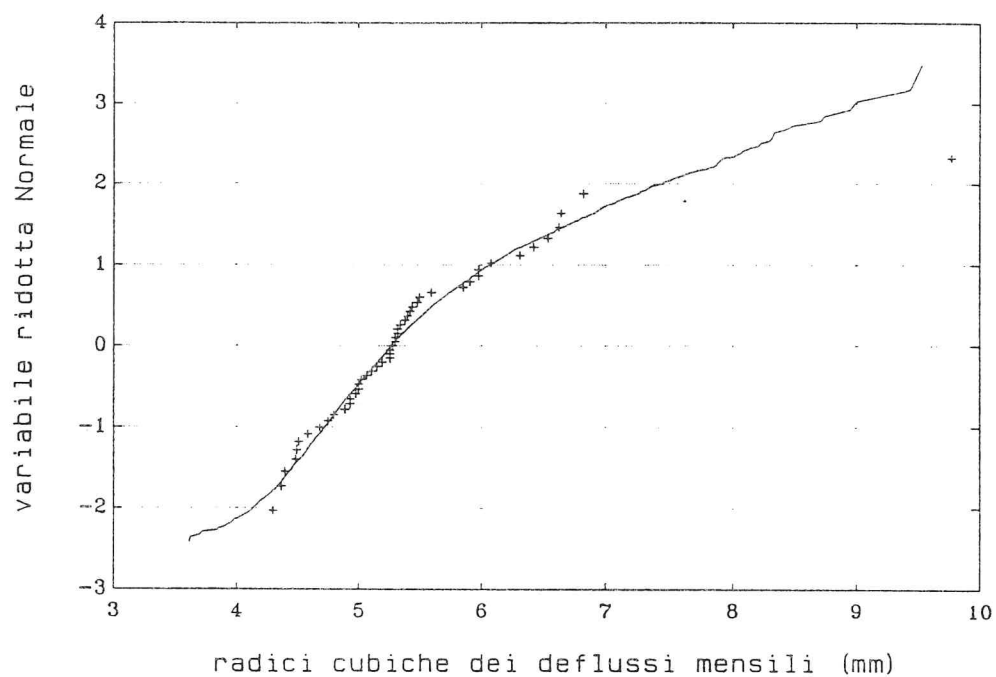


Fig. 4 - Tevere a Roma: Adattamento dei dati di deflusso nel mese di Settembre alla distribuzione di probabilità ottenuta per simulazione.

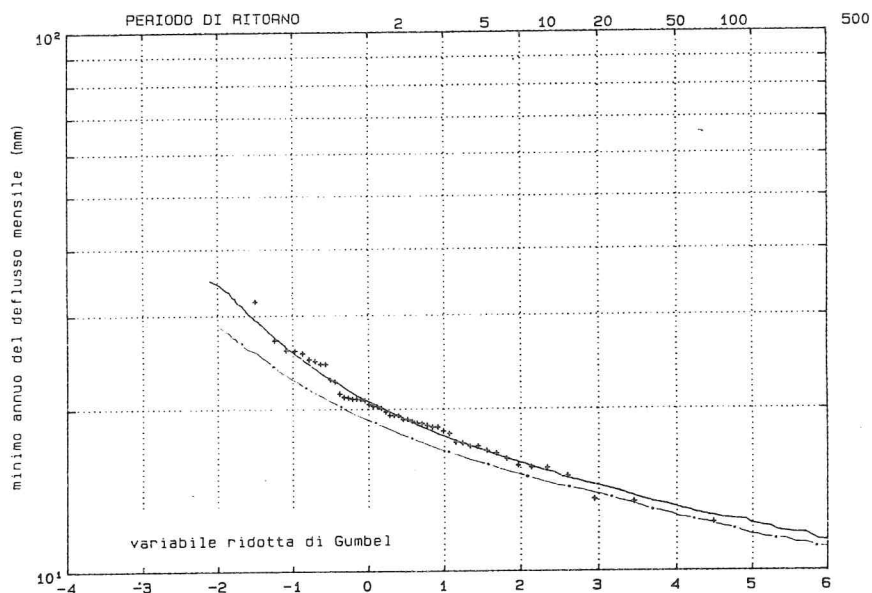


Fig. 5 - Tevere a Roma: Adattamento dei dati di minimo annuo del deflusso mensile alla distribuzione di probabilità ottenuta per simulazione (tratto continuo) ed alla curva di distribuzione simulata del minimo annuo del deflusso mensile di falda profonda.

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Con la metodologia proposta si è inteso fornire un contributo all'analisi statistica delle magre dei corsi d'acqua seguendo la logica di riprodurre con un modello stocastico a base concettuale l'intero processo dei deflussi e ricavare da esso le proprietà statistiche dei valori minimi. Questa impostazione consente di superare i limiti connessi all'impiego di modelli statistici di tipo empirico.

Alla scala di aggregazione temporale mensile, il modello stocastico dei deflussi è stato derivato da una rappresentazione concettuale del processo. I deflussi mensili relativi a bacini appenninici possono essere considerati somma dei contributi provenienti da falde sotterranee ad esaurimento pluriennale, falde sotterranee ad esaurimento stagionale e deflusso diretto.

Schematizzando le falde come invasi lineari ed assumendo il deflusso diretto proporzionale all'afflusso netto, cioè ad un processo indipendente periodico, si ricava un modello stocastico della classe ARMA con coefficienti in corrispondenza biunivoca con i coefficienti del modello concettuale.

La metodologia proposta può essere applicata alla previsione dei deflussi di magra e, più in particolare, alla riproduzione delle caratteristiche dei deflussi in tali periodi, a diversa scala temporale.

Allo scopo di verificare la capacità del modello di riprodurre la distribuzione di probabilità del minimo annuo del deflusso mensile, si è adottata una tecnica di simulazione con metodo Monte-Carlo.

I risultati conseguiti in tale applicazione possono essere ritenuti pienamente soddisfacenti.

Una valutazione più profonda della capacità descrittiva del modello può essere ricavata attraverso la sua applicazione a deflussi in periodi di deficit di diversa durata.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] BENJAMIN J.R., CORNELL C.A. (1970). Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers Mc. Graw Hill Book Co., New York.
- [2] BERAN M.A., RODIER J.A. (1985). Hydrological Aspects of Droughts studies and reports in Hydrology, 39. Unesco, Paris, 149 p.
- [3] BERAN M.A. (1989). Droughts: processes and future, Interregional Symposium on Groundwater Resources in Drought Prone Areas, New Delhi, India.
- [4] CLAPS P. (1990). Modelli stocastici dei deflussi dei corsi d'acqua Dottorato di Ricerca in Ing. Idraulica, Napoli, Dissertazione presentata per il conseguimento del titolo.
- [5] GOTTSCHALK L., PERZYNA G. (1989). A physically based distribution function for low flow, Hydrological sciences Journal, 34, 559-573.
- [6] SALAS J.D., SMITH R.A. (1981). Physical basis of stochastic models of annual flows, Water Resour. Res., 17(2), 428-430.
- [7] SOROOSHIAN S., GUPTA V.K. (1985). The analysis of structural identifiability: Theory and application to conceptual rainfall-runoff models, Water Resour. Res., 21(4), 487-495.
- [8] WAYLEN P.R., WOO M. (1987). Annual low flows generated by mixed processes, Hydrological sciences Journal, 32, 3, 371-383.

