

Valutazione delle risorse idriche

1. ASPETTI TEORICI

1.1. Cenni di probabilità e statistica applicate allo studio dei deflussi superficiali

1.1.1. DEFINIZIONE DI VARIABILE CASUALE

I fenomeni fisici che determinano la formazione dei deflussi superficiali di un corso d'acqua vanno senza dubbio considerati dei fenomeni aleatori, nel senso che non è possibile, alla luce delle conoscenze che abbiamo sulla loro dinamica, prevedere deterministicamente in che maniera essi evolveranno in futuro. Ciò comporta che, per studiarli ai fini delle applicazioni di carattere ingegneristico, occorre esaminarli seguendo le leggi della probabilità e della statistica. In statistica, appunto, una grandezza $x(t)$ i cui valori x variano nel tempo t in maniera disordinata e casuale, viene definita *variabile casuale*. Ad una tale variabile possono essere attribuite diverse proprietà.

Essa si definisce *indipendente* se ogni valore $x(t)$ che essa assume al tempo t non può essere posto in relazione con i valori che essa aveva assunto al tempo $t-1$, $t-2$, etc. Si definisce, invece, *autocorrelata*, se tra i valori $x(t)$, $x(t-1)$, $x(t-2)$, etc. è possibile stabilire dei legami di tipo correlativo, nel senso che tra valori che si pongono nella stessa sequenza temporale esiste, in media, una modalità con la quale $x(t-1)$ tende ad essere legato ad $x(t)$, $x(t-2)$ tende ad essere legato a $x(t-1)$, etc.

Una variabile casuale si definisce *stazionaria* in una sua caratteristica, ad esempio nella media, se questa caratteristica osservata su di una finestra temporale τ è costante al variare dell'istante iniziale del periodo τ .

Nell'ambito delle serie idrologiche, la variabile casuale viene definita, piuttosto che effettuando un campionamento (cioè una misura) in un dato istante, cumulando la grandezza sull'intervallo di tempo, per cui quando si parla di serie storiche annue o mensili ci si riferisce a sequenze di dati cumulati, o mediati, sull'anno o sul mese. Le grandezze di riferimento usate per la misura dei deflussi possono essere:

- portate medie nell'intervallo di tempo di riferimento, espresse in m^3/s
- deflusso, espresso in milioni di metri cubi (Mm^3 o $\text{m}^3 \cdot 10^6$)
- altezza di deflusso sulla superficie del bacino sotteso, espressa in mm.

Ai fini tecnici, queste grandezze possono, in generale, essere considerate delle variabili stazionarie in gran parte delle loro caratteristiche. Infatti, anche se ciò suscita qualche perplessità ogni qualvolta si verificano lunghi periodi siccitosi, la maggioranza degli studi

condotti fino ad oggi sull'argomento non ha potuto dimostrare in maniera certa che vi è una tendenza sistematica, indipendente dall'azione dell'uomo, alla riduzione dei deflussi dei corsi d'acqua.

I deflussi annui, se misurati con riferimento all'*anno idrologico*, che va dall'inizio del mese in cui di norma inizia la stagione piovosa all'inizio dello stesso mese dell'anno successivo, possono essere considerati delle variabili casuali indipendenti. Ciò si verifica, ad esempio, nella maggior parte dei fiumi dell'Italia meridionale, aventi caratteristiche piuttosto torrentizie, con caratteristiche climatiche a spiccata ciclicità annuale. Nei bacini idrografici di questi fiumi le precipitazioni relative ad un determinato anno idrologico escono dal bacino, mediante evapotraspirazione e deflusso superficiale o sub-superficiale, di norma all'interno dello stesso anno, non creando così alcuna dipendenza tra i valori di deflusso di un determinato anno e le precipitazioni dell'anno precedente. In questo caso, a maggior ragione, non esiste correlazione tra deflussi relativi ad anni successivi (autocorrelazione). Per lo stesso motivo possono essere considerati indipendenti i deflussi delle stagioni secche (stagioni per le quali le portate medie mensili si mantengono al di sotto della portata media annua).

I deflussi mensili, invece, presentano una marcata autocorrelazione, non esaurendosi all'interno del singolo mese il fenomeno di trasformazione degli afflussi meteorici in deflussi fluviali.

1.1.2. DEFINIZIONE DI DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ

La distribuzione di probabilità di una variabile casuale (indipendente) è uno strumento che stabilisce con criteri obiettivi qual è quel suo valore corrispondente ad un certo rischio di deficienza (o di non-eccedenza) in uno o più periodi di tempo con riferimento ai quali la variabile viene osservata o misurata.

Essa è una funzione che definisce la probabilità (detta *cumulata*) $F(x)$ con la quale un determinato valore x della variabile in esame non viene superato. Questa funzione può, in linea di principio, assumere forma qualsiasi, purché essa sia monotona crescente e i valori che essa assume siano compresi nell'intervallo $[0,1]$. La funzione $F(x)$ è caratterizzata da uno o più parametri che servono ad adattare il suo andamento alle frequenze cumulate dei dati storici, i quali rappresentano le misure della x di cui si dispone.

Questi parametri sono generalmente riconducibili a quelli che si definiscono i *momenti*, di diverso ordine, della *funzione di densità di probabilità* $f(x)$, che rappresenta la derivata della funzione di probabilità cumulata:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (1)$$

Tra i momenti, il cui ordine è determinato dall'esponente della x , quelli più utilizzati sono la

sono la *media* (momento del primo ordine rispetto all'origine):

$$\mathbf{m}_x = \int_0^{\infty} x f(x) dx, \quad (2)$$

e la *varianza*, o momento del secondo ordine rispetto alla media:

$$\mathbf{s}_x^2(x) = \int_0^{\infty} [x - \mathbf{m}_x]^2 f(x) dx \quad (3)$$

Oltre ai momenti, tornano molto utili alcuni coefficienti adimensionali ad essi legati, quali il *coefficiente di asimmetria*, che dipende dai momenti del secondo e del terzo ordine:

$$\mathbf{g}(X) = \frac{\int_0^{\infty} [X - \mathbf{m}(X)]^3 f(X) d(X)}{\left(\int_0^{\infty} [X - \mathbf{m}(X)]^2 f(X) d(X) \right)^{3/2}} \quad (4)$$

La radice quadrata \mathbf{s}_x della varianza si definisce *scarto quadratico medio*, mentre si definisce *coefficiente di variazione* il rapporto $cv = \mathbf{s}/\mathbf{m}$

Esistono diverse forme analitiche utilizzabili per $F(x)$, la più nota delle quali è la *legge normale del caso*, o *legge di Gauss*, che contiene solo due parametri, coincidenti con \mathbf{m}_x e σ_x^2 :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\mathbf{s}\sqrt{2\mathbf{p}}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mathbf{m}}{\mathbf{s}}\right)^2\right] dx \quad (5)$$

Essendo tale integrale non risolvibile analiticamente, l'applicazione di questa funzione è possibile attraverso l'uso di tabelle o di approssimazioni polinomiali (riportate ad es. in *Maione e Moisello*, 1993) espresse in entrambi i casi con riferimento alla *variabile normale standard*:

$$u = \frac{x - \mathbf{m}}{\mathbf{s}} \quad (6)$$

Questa variabile, avente media zero e varianza 1, è univocamente legata alla corrispondente espressione della legge normale:

$$F(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{p}}} \exp\left[-\frac{1}{2}u^2\right] du \quad (7)$$

Fissata una probabilità cumulata F ad essa corrisponde una ed una sola u , cosicchè la $u(F)$ è tale da fornire la x tramite la relazione

$$x = u(F) \mathbf{s} + \mathbf{m} \quad (8)$$

Nota la distribuzione di probabilità, la variabilità di una grandezza aleatoria si può esprimere anche attraverso appositi *indici statistici*, quali ad esempio i valori a fissati livelli di probabilità. Di solito però, si fa riferimento ai concetti di *periodo di ritorno T* e di *rischio in N anni*, piuttosto che alla probabilità cumulata, per cui è conveniente esprimere i legami tra le suddette definizioni.

Il minimo di x corrispondente ad un tempo di ritorno di T anni (se si fa riferimento a grandezze osservate una sola volta o globalmente in 1 anno) è quello che mediamente verrà "non superato" una volta in T anni. Poiché con questo concetto si risponde alla domanda "con quale frequenza si osserva un certo deficit ?" si intuisce facilmente che più alto è il tempo di ritorno di un fissato deficit, più bassa è la sua frequenza e quindi più improbabile è il non superamento del valore in oggetto.

Il valore x_T del deflusso *minimo con periodo di ritorno T* è determinato in corrispondenza della probabilità cumulata:

$$F(x_T) = 1 / T \tag{9}$$

con $F(x)$ che rappresenta la probabilità di non superamento della grandezza x in 1 anno (o il *rischio R* in 1 anno). Probabilità cumulate corrispondenti a periodi di ritorno "tipo" sono:

$T=10$	$F = 0.1$
$T=20$	$F = 0.05$
$T=50$	$F = 0.02$

Il valore $x_{R,N}$ della variabile x che ha un rischio R_N di non essere raggiunto nell'ambito di N anni consecutivi (cioè conteggiando complessivamente il periodo di N anni) è detto *minimo di x con rischio R_N in N anni* ed è ottenuto in corrispondenza della probabilità cumulata:

$$F(x_{R,N}) = 1 - (1 - R_N)^{1/N} \tag{10}$$

Si riportano, a titolo di esempio, le probabilità cumulate corrispondenti ad alcuni valori di rischio R e di periodi di riferimento di N anni:

$x_{10,0.05}$	$F = 0.00512$
$x_{20,0.05}$	$F = 0.00256$
$x_{20,0.025}$	$F = 0.00127$
$x_{50,0.025}$	$F = 0.00051$

Dal confronto tra i valori sopra tabellati si evince che il numero di anni corrispondente al periodo di ritorno dev'essere molto elevato perché i corrispondenti valori di x_T possano ricondursi a quelli di $x_{R,N}$. La ragione di ciò è che mentre nel concetto di rischio in N anni, gli N anni sono globalmente considerati nell'occorrenza dell'evento sfavorevole, il periodo di ritorno corrisponde ad un concetto che, inteso correttamente in senso probabilistico, è meno chiaro del primo. Infatti, se nel primo dei T anni di periodi di ritorno si verifica già l'evento sfavorevole, la probabilità che si verifichi ancora negli anni successivi non diminuisce affatto (e neppure aumenta se non si verifica). Nell'ambito delle valutazioni effettuate in questo studio si ritiene quindi più corretto far riferimento unicamente al concetto di rischio R_N in N anni o di rischio semplice R (in 1 anno).

1.1.3. LA STIMA DEI PARAMETRI DELLA DISTRIBUZIONE

La stima dei parametri della distribuzione viene sempre effettuata ponendo in sistema, generalmente non lineare, alcune funzioni teoriche dei parametri del modello probabilistico ed i valori assunti da queste funzioni con riferimento ai dati osservati disponibili nella serie storica.

Le diverse tecniche di stima si distinguono per la scelta del tipo di funzione da utilizzare. Tra queste, le più note sono quelle che vanno sotto il nome di *metodo dei momenti*, *metodo della massima verosimiglianza*, *metodo della massima entropia*.

Il metodo più semplice, quello dei momenti, molto utilizzato dai tecnici, è purtroppo anche quello meno efficiente, in quanto fornisce stime molto sensibili alla variabilità delle osservazioni e pertanto poco affidabili. Gli altri due, più complessi nelle modalità applicative, forniscono, invece, stime di minima incertezza con rispetto all'informazione fornita dalle osservazioni. Fortunatamente, con riferimento alla distribuzione *normale*, le stime di massima verosimiglianza coincidono teoricamente con le relazioni riferite al metodo dei momenti.

I parametri della distribuzione di probabilità di ogni variabile idrologica possono essere stimati, in base all'informazione fornita dai dati disponibili, utilizzando *stimatori puntuali* o *stimatori regionali*.

Uno stimatore puntuale, utilizzabile allorché si dispone di un numero sufficiente di osservazioni della grandezza idrologica di interesse nel sito di progetto, richiede solo la definizione di una tecnica di stima dei parametri.

Nei casi in cui non si dispone di dati direttamente osservati nel sito di interesse, è necessario ricorrere a tecniche di *stima regionale* dei parametri. Esse consistono nella ricerca dei legami esistenti tra le caratteristiche climatiche e fisiografiche misurabili nella regione che comprende il sito di interesse ed il parametro del quale si richiede la stima. Con riguardo ai fenomeni idrologici si tratta, in pratica, di analizzare i complessi legami esistenti tra precipitazioni,

deflussi e caratteristiche del suolo, non con riferimento ai singoli eventi, bensì rivolgendo l'attenzione al comportamento statistico di detti legami.

1.1.4. ALCUNI ESEMPI DI DISTRIBUZIONI DI PROBABILITÀ DI VARIABILI IDROLOGICHE

La distribuzione dei deflussi annui

Le curve di distribuzione di probabilità dei deflussi, che sono la traduzione in forma grafica della distribuzione di probabilità, vengono usate per rappresentare la probabilità cumulata che compete ad ogni possibile valore del deflusso. Di fatto, i dati disponibili non coprono con continuità il campo dei valori possibili per cui queste curve servono sia ad interpolare analiticamente i dati che a fornire valori di estrapolazione.

La descrizione statistica dei deflussi di un corso d'acqua inizia usualmente con le caratteristiche legate alla loro variabilità di anno in anno. Peraltro, in assenza di dati, la valutazione del deflusso medio annuo corrisponde di fatto alla determinazione della media generale delle portate fluviali. Un motivo importante per cui è utile analizzare i deflussi fluviali è che le relative serie storiche sono *stazionarie*, prive cioè di tendenze o ciclicità che possono influenzare l'interpretazione di un dato generico. Inoltre, in gran parte dei corsi d'acqua dell'Italia meridionale, la variabile deflusso annuo è sostanzialmente incorrelata, cosa che rende la distribuzione di probabilità del tutto sufficiente a descrivere la struttura di questo processo idrologico.

L'analisi probabilistica delle serie storiche osservate dei deflussi annui D mostrano che questi non sono di solito distribuiti secondo la citata *legge normale*, legge alla quale ci si può però ricondurre trasformando i dati secondo l'espressione, detta di *Box-Cox*:

$$y = \frac{D^{\lambda} - 1}{\lambda}, \quad (11)$$

per la quale, y tende a D per $\lambda=1$ ed a $\ln(x)$ per $\lambda=0$. In quest'ultimo caso, si dice che x è distribuito secondo la *legge log-normale*. Il valore più opportuno da adottare per λ deve essere scelto di volta in volta, come si vedrà più avanti, in base all'informazione idrologica contenuta nei dati di deflusso disponibili nel sito di interesse od a quella fornita dall'insieme delle serie di dati disponibili nella regione. Studi già eseguiti su corsi d'acqua dell'Italia centro-meridionale, mostrano che λ tende ad assumere valori poco variabili intorno a 0.3.

Adoperando il legame tra probabilità cumulata e *variabile normale standard* (variabile, distribuita secondo la legge *normale*, avente media nulla e scarto quadratico medio pari ad 1)

$$y(F) = \mathbf{m}_y + \mathbf{u}(F) \mathbf{s}_y \quad (12)$$

e la relazione

$$D(F) = [1 + \mathbf{I} \ y(F)]^{1/\mathbf{I}} \quad (13)$$

si ottengono i valori di $D_{R,N}$. Nella (12), $\mathbf{u}(F)$ rappresenta la *variabile normale standardizzata*, corrispondente alla probabilità cumulata F .

La distribuzione dei deflussi della stagione secca

Un discorso del tutto analogo può farsi per i deflussi della stagione secca, la distribuzione di probabilità dei quali è di fondamentale importanza per poter stimare le capacità di compenso da assegnare agli invasi per eseguire, con assegnato rischio di deficit, un'efficiente regolazione dei deflussi.

Anche per i deflussi della stagione secca è possibile utilizzare la trasformata di Box-Cox, definita dalla (11), con opportuno valore di \mathbf{I} , per ricondurre i dati osservati alla distribuzione *normale*.

1.1.5. LE TECNICHE DI STIMA DELL'ESPONENTE DELLA TRASFORMATATA DI BOX - COX

La scelta della legge di distribuzione di probabilità per una variabile idrologica si riconduce, il più delle volte, a determinare l'indice della trasformata di Box-Cox della *legge normale*, che in via approssimata, ma decisamente accettabile, indica che la variabile

$$y = x^{\mathbf{I}} \quad \mathbf{I} \neq 0$$

$$y = \log(x) \quad \mathbf{I} = 0$$

è distribuita *normalmente*.

I criteri alla base di tale scelta sono dettagliatamente riportati, ad esempio, in *Rossi e Silvagni* (1980). Basti qui ricordare che l'obiettivo dell'analisi è quello di determinare un valore di \mathbf{I} per cui la y sia *normale*.

In prima analisi la variabile y può considerarsi distribuita normalmente se il suo coefficiente di asimmetria è statisticamente equivalente a zero. Pertanto, il primo passo dell'analisi è quello di ricercare il valore di λ che più frequentemente azzerava il coefficiente di asimmetria nella zona. A questa valutazione si arriva calcolando per ogni valore di λ il coefficiente di asimmetria medio pesato nella regione.

Nell'analisi regionale, necessaria per costruire la distribuzione di probabilità di una variabile in assenza di dati, un requisito indispensabile è l'individuazione di una regione nella quale lo

scarto s_y della variabile y sia costante. Pertanto, l'indice I ottimale da scegliere per la trasformata dovrebbe anche, per quanto possibile, condurre alla costanza della varianza della variabile trasformata.

Per tener conto di questo duplice obiettivo si può considerare che, al primo ordine di approssimazione di solito sufficiente in questi casi) lo scarto quadratico medio della variabile non trasformata è legato, con legge di potenza, alla media, sempre della variabile non trasformata. In generale, infatti, vale:

$$s_y = s_x \left. \frac{dy}{dx} \right|_{m_x} \quad (14)$$

dove la derivata è calcolata nel punto $x=m_x$. Nel caso in cui $y=x^I$, la (14) si specializza in

$$s_y = s_x I m_x^{I-1} \quad (15)$$

Laddove risultasse $s_y = \text{cost}$, si avrebbe anche

$$s_x = C' m_x^{1-I} \quad (16)$$

con I ottenibile (come esponente della legge di potenza) tramite una regressione lineare sui logaritmi delle variabili s_x e m_x :

$$\ln s_x = \ln C' + (1-I) \ln m_x \quad (17)$$

Il legame media-scarto è del tutto equivalente al legame media-coefficiente di variazione, in quanto dalla (15) si ha anche:

$$s_y = cv_x I m_x^I \quad (18)$$

che, con $s_y = \text{cost.}$, conduce alla relazione

$$cv_x = C m_x^{-I} \quad (19)$$

In base al ragionamento fatto, il coefficiente λ che risulta dalla stima della (16) o della (19) è quello che più di tutti produce $s_y = \text{cost.}$

La scelta del coefficiente I può essere quindi affidata alla verifica che lo scarto della variabile y sia effettivamente costante nella regione, condizione che è più strettamente legata, di quella relativa all'asimmetria, alla determinazione su base regionale del parametro s_y .

1.2. I modelli di regionalizzazione dei deflussi superficiali

Come detto nei paragrafi precedenti, ai fini della pianificazione e gestione delle risorse idriche, è necessario disporre della distribuzione di probabilità dei deflussi annui, strumento che stabilisce con criteri obiettivi qual è il deflusso corrispondente ad un certo rischio di deficienza in uno o più anni.

La determinazione della distribuzione di probabilità di una variabile idrologica in un sito in cui mancano dati avviene secondo le seguenti fasi:

- scelta della legge di probabilità più idonea a rappresentare il fenomeno (su base regionale);
- applicazione di criteri di similitudine idrologica per la valutazione dei parametri della legge di probabilità, che possono riassumersi in:
 1. controllo dell'eventuale costanza di uno o più parametri nella regione indagata;
 2. ricerca di legami tra i valori dei parametri e valori assunti da grandezze fisiografiche o climatiche di riferimento.

1.2.1. LA STIMA DEL DEFLUSSO MEDIO ANNUO

La determinazione dei deflussi a partire dagli afflussi è compito meno semplice di quanto possa sembrare ad un approccio superficiale. A tal fine va innanzitutto ricordato che il legame tra le due variabili è certamente non lineare, nel senso che non c'è proporzionalità tra afflussi e deflussi. Infatti, alla scala annua ed in assenza di forti componenti di deflusso da falde profonde, il deflusso è pari all'afflusso sottratto della evapotraspirazione, la quale dipende a sua volta dalla umidità del suolo, cioè dalla disponibilità di acqua pronta ad evaporare ed essere assorbita dalle piante.

L'umidità del suolo è fortemente correlata all'afflusso, nel senso che maggiore è la quantità di precipitazione annua in una zona, maggiore è la probabilità che il suolo sia umido durante gran parte dell'anno. Ciò implica che l'evapotraspirazione cresce al crescere dell'afflusso (ma non proporzionalmente ad esso) e ciò avviene fino a che non si raggiungano livelli di afflusso tali da mantenere il suolo costantemente umido. A quel punto l'evapotraspirazione non cresce più con l'afflusso e si raggiunge il valore di evapotraspirazione potenziale.

Solo in tale ultima condizione, che di fatto non si verifica mai nelle nostre regioni, si ha una certa proporzionalità tra l'afflusso ed il deflusso. Nella generalità dei casi, in Italia Meridionale, se l'afflusso diminuisce di una quantità x il deflusso diminuirà di una quantità ben maggiore di x . Trascurare tale non proporzionalità tra afflussi e deflussi può condurre ad errori di entità molto elevata.

Per quanto fin qui detto, la relazione tra medie degli afflussi e medie dei deflussi viene interpretata come un legame che ha un fondamento teorico, ma comunque soggetto ad

incertezze di varia natura (affidabilità dei dati, variabilità delle condizioni all'interno dell'anno, variabilità nella quota e nella copertura vegetale nell'ambito di grandi bacini, influenza di fattori geologici, etc.). In casi come questo, in cui molte variabili influenzano il legame tra due grandezze, tale legame sarà di tipo statistico, cioè sarà costituito da una legge di *regressione*. Di fatto, la legge di regressione fornisce una curva di miglior adattamento ai dati osservati, curva per la quale è minima la somma dei quadrati delle deviazioni dei punti osservati dalla curva stessa (*curva dei minimi quadrati*).

Per una relazione tra due grandezze x e y vi possono essere diverse leggi di tipo regressivo che apparentemente forniscono una buona interpretazione del legame (ad esempio leggi lineari, del tipo $y=a + b x$, o di potenza, ad esempio $y=c x^d$). In assenza di informazioni a priori sui fenomeni che sono messi in relazione, di solito viene scelta la relazione che fornisce il miglior adattamento ai dati. L'adattamento viene misurato attraverso il *coefficiente di correlazione* r , o il *coefficiente di determinazione* R^2 (v. es. *Piccolo e Vitale*, 1984) che è il quadrato del precedente. I valori che possono assumere questi coefficienti sono compresi tra 0 (nessuna relazione tra le variabili) ed 1 (perfetta dipendenza tra le variabili). In questo caso, la legge che fornisce il più alto coefficiente di correlazione è quella da adottare.

Nel nostro caso, però, la legge di regressione può e deve essere ricercata tenendo presente i caratteri del fenomeno fisico di trasformazione afflusso-deflusso. Sono pertanto da escludersi procedure automatiche che ricercano la legge di migliore adattamento unicamente in base al coefficiente di correlazione, in quanto non vi è garanzia che tale relazione sia valida in un'altra regione. Più avanti verrà commentata l'applicazione pratica del ragionamento appena esposto alla regione in studio.

Quanto appena detto, in aggiunta a considerazioni teoricheⁱ sulle modalità ottimali di applicazione delle leggi di regressione ed a verifiche sul campo, suggerisce che la relazione tra deflusso ed afflusso debba essere del tipo

$$D_m^{1/3} = c_1 + c_2 \log A_m \quad (20)$$

ⁱ La teoria della regressione (si veda es. *Piccolo e Vitale*, 1984) ci dice che la regressione tra due variabili ha la massima efficacia quando entrambe le variabili hanno distribuzione di probabilità Normale. Rossi e Silvagni (1980) hanno mostrato che le radici cubiche dei deflussi annui sono ben rappresentate da una distribuzione di probabilità *normale* (Gaussiana), mentre Benjamin e Cornell (1970) sostengono la validità della legge LogNormale per gli afflussi annui. Questo indirizza in qualche modo verso un legame lineare esistente tra i logaritmi degli afflussi e le radici cubiche dei deflussi (Rossi, 1987). Verifiche empiriche (Triuzzi, 1982) hanno mostrato la validità di tale legame praticamente in tutta l'Italia Meridionale.

con D_m = media dei deflussi annui, e A_m = media degli afflussi annui.

In generale i valori di D_m valutati con la (20) possono considerarsi *comprensivi* degli apporti sorgentizi, sempre che le sorgenti si ricarichino con afflussi che incidono su aree interne al bacino idrografico.

Quando al deflusso annuo contribuiscono invece sorgenti il cui bacino di ricarica è parzialmente posto al di fuori del bacino idrografico delimitato dallo spartiacque superficiale, relazioni del tipo della (20) sottostimano il valore del deflusso medio annuo, in quanto come area contribuyente (per passare dal valore in mm a quello in Mm³) si considera una superficie inferiore a quella nella quale vengono effettivamente drenati gli afflussi. Per questo meccanismo i bacini che presentano questo comportamento sono caratterizzati da valori alti di deflusso in mm se confrontati con i corrispondenti valori di afflusso.

1.2.2. LA STIMA DEL VALORE MEDIO DEI DEFLUSSI NELLA STAGIONE SECCA

I deflussi della stagione secca, nel seguito indicati con d , risultano anch'essi molto variabili da un anno all'altro ed il loro valore medio d_m tende, in generale, ad essere fortemente correlato con il valore medio annuo D_m , osservato ovviamente nella stessa sezione del corso d'acqua.

Il legame correlativo è generalmente assunto come (Rossi, 1987)

$$d_m = b D_m^a \quad (21)$$

e va di volta in volta precisato utilizzando i dati disponibili, individuando zone omogenee rispetto ai valori assunti dai coefficienti a e b .

Per la stima regionalizzata dell'esponente della trasformata di Box-Cox che meglio riconduce i deflussi della stagione secca alla distribuzione *normale*, e per la conseguente stima della varianza regionale, valgono le stesse considerazioni e le stesse procedure adottate con riferimento ai deflussi annui.

2. TARATURA DEI MODELLI DI REGIONALIZZAZIONE

In questo capitolo vengono esposti i risultati delle elaborazioni tendenti a precisare le relazioni che consentono la stima, in punti qualsiasi dei bacini ionici e tirrenici della regione Basilicata, delle distribuzioni di probabilità delle variabili idrologiche precedentemente introdotte. In particolare, si chiariscono i passaggi seguiti per la scelta del tipo di distribuzione di probabilità da adottare e si specificano le relazioni trovate per la stima dei parametri della distribuzione (media e varianza in questo caso) su base regionale.

Questa procedura viene applicata solo parzialmente alle precipitazioni in quanto per esse sono necessari unicamente i valori medi, nell'ambito della stima della media dei deflussi.

2.1. Stima del valore medio annuo delle piogge areali (afflussi)

Per valutare l'afflusso medio annuo ad un bacino si opera estendendo spazialmente l'informazione puntuale rappresentata dai dati raccolti alle stazioni di misura pluviometriche. Come precedentemente accennato, l'estensione spaziale di questa informazione si ottiene solitamente mediante i poligoni di Thiessen, i quali consentono anche di individuare le stazioni di misura pluviometriche "di pertinenza" dei bacini di interesse, cioè quelle comprese in aree di influenza che coprono parte della superficie del bacino.

I topoieti consentono di pesare su di un'area l'influenza della precipitazione misurata in corrispondenza di una data stazione. Se un topoieto copre una superficie s di un bacino di area S , la media delle precipitazioni misurate sulla corrispondente stazione concorrerà a determinare il valore dell'afflusso medio al bacino con un peso s/S . Se ci sono k stazioni aventi influenza su un bacino, l'afflusso medio risultante sarà quindi la media pesata dei valori h_i relativi ai k pluviometri:

$$A_m = \sum_{i=1}^k h_i s_i / S$$

dove con h_i e s_i si sono indicate le precipitazioni medie annue e le aree "di influenza" dei topoieti riferiti alla generica stazione i .

Le tabelle 1 e 2 riportano l'elenco delle stazioni pluviometriche considerate (anche riportate nell'allegata *Corografia* in scala 1:250.000) unitamente ad informazioni relative alle caratteristiche delle stazioni stesse e delle corrispondenti serie storiche di altezza di precipitazione.

Nel capitolo 3 verranno esposti i risultati della stima degli afflussi medi effettuata con il metodo

appena descritto.

2.2. Stima del deflusso medio annuo

In questo paragrafo si riportano i risultati dell'applicazione delle metodologie di analisi regionale descritte al paragrafo 1.2.1. Queste conducono alla determinazione di leggi che legano la variabilità, da sito a sito, del deflusso medio annuo D_m rispetto all'afflusso medio annuo A_m , per bacini con trascurabile contributo di deflussi sorgentizi.

A tal fine si sono presi in considerazione i dati di afflusso e di deflusso disponibili per i bacini sottesi da sezioni di misura dell'allora SII (Servizio Idrografico Italiano), oggi SIMN (Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale).

Le stazioni di misura delle portate (stazioni idrometriche) esistenti nell'area di indagine sono elencate in Tab. 3, mentre le serie storiche disponibili in corrispondenza delle stazioni hanno caratteristiche riportate in Tab. 4. In Tab. 5 sono invece riportate le caratteristiche delle serie storiche rielaborate nell'ultima edizione della Pubbl. N. 17 del SIMN (Min.LL.PP., 1970) dalla quale sono stati tratti i dati usati per la determinazione dei legami afflussi-deflussi su base annua.

E' opportuno segnalare che le aree misurate dal SIMN, relativamente ai bacini sottesi dalle sezioni interessate dalla misura, sono state ricalcolate in questo studio usando cartografia in scala 1:25.000 digitalizzata. Pertanto, nelle tabelle successive alla 3 i valori delle aree corrispondenti alle citate sezioni saranno quelli qui rivalutati.

Per la stima dei coefficienti delle rette di regressione di tipo (20), utilizzando i dati riportati in Tab. 6 si sono individuate le seguenti due leggi:

$$D_m^{1/3} = -37.58 + 15.06 \log A_m \quad (22)$$

$$D_m^{1/3} = -28.2 + 11.98 \log A_m \quad (23)$$

la prima delle quali è valida per i soli bacini del Bradano mentre la seconda vale per i restanti bacini della regione. Le Figg. 1 e 2 mostrano il grado di adattamento di queste curve ai valori osservati.

Per la stima delle relazioni $D_m(A_m)$ non sono stati utilizzati i dati di Tab. 6 relativi ai bacini dell'alta valle dell'Agri e dell'alto Basento, in quanto questi bacini presentano valori di D_m decisamente più alti di quelli derivanti dalla relazione che emerge dagli altri dati nell'ampia regione considerata. Ciò lascia anche presupporre che le sorgenti che contribuiscono alla formazione del deflusso annuo in quei bacini hanno una zona di ricarica che si estende significativamente al di fuori del bacino delimitato dallo spartiacque superficiale.

Dall'analisi dei risultati ottenuti emergono le seguenti considerazioni:

- I bacini del Bradano presentano i valori di afflusso più bassi, a conferma del fatto che essi ricadono nella zona più arida della regione. Essi, inoltre, esaltando per lo stesso motivo i meccanismi di evapotraspirazione, presentano, a parità di A_m , valori più bassi di D_m rispetto agli altri bacini. La legge di regressione, tarata sui dati delle quattro stazioni disponibili, non è stata però ritenuta sufficientemente affidabile, in quanto sembrava dipendere eccessivamente dal dato del Sagliocchia, piuttosto distante dagli altri in termini di afflusso. Considerando, inoltre, che il bilancio idrologico a Tavole Palatine risulta fortemente dubbio a causa della presenza, poco a valle di S.Giuliano, di zone carsiche, si è ritenuto di adottare, per l'intero Bradano, l'andamento risultante dalla congiungente i dati relativi a P.te Colonna e S.Giuliano. Dal confronto delle due rette riportate in Fig.2, si nota, ad ogni modo, che le due stime non differiscono sostanzialmente.
- I sottobacini del Noce mostrano un comportamento che li discosta dai restanti bacini della regione. Essi, infatti, presentano, nelle due sezioni per le quali si dispone di dati (che sono tra l'altro significativamente distanti tra loro) valori praticamente coincidenti di D_m . Ricordando che queste due grandezze sono misurate in mm, e quindi rapportate all'area del bacino, ne discende che i deflussi medi annui del Noce tendono sostanzialmente a variare linearmente con la superficie. Ciò significa che rimane costante su tutto il bacino (e pari a $D_m = 1909$ mm) l'altezza di deflusso annuo. Questo fenomeno può spiegarsi con l'effetto combinato delle precipitazioni nevose, molto intense nella parte alta del bacino, e delle portate sorgentizie, ben distribuite tra la parte alta e la parte bassa.
- Nell'analisi del rapporto tra afflusso e deflusso nel bacino del Noce è importante rimarcare che il dato di afflusso al bacino del Noce a La Calda, tratto dalla Pubbl. n. 17 del SIMN, è stato successivamente stimato in questo studio pari a 1909 mm, valore certamente più attendibile ed uguale a quello relativo al Noce a Le Fornaci. Il dato di 1670 mm riportato sulla Pubbl. n. 17 è invece chiaramente sottostimato, in quanto risulta nettamente inferiore all'afflusso del Noce a Le Fornaci, che ha sezione di chiusura posta 12 km più a valle.

In Tav. 1 sono evidenziate le tre zone risultanti dall'analisi appena descritta, zone che risultano omogenee rispetto alla relazione $D_m(A_m)$. In particolare, nella *zona 1* vale, tra le citate grandezze, la relazione (22), nella *zona 2* vale la (23) mentre nella *zona 3* il deflusso in mm è costante e pari a $D_m=1909$ mm.

2.3. Stima della varianza e della trasformata di Box -Cox per i deflussi annui

L'uso delle metodologie esposte nel *par. 1.1.5* consente di individuare la corretta distribuzione di probabilità per la variabile considerata e di controllare se esiste un valore unico regionale della varianza della distribuzione.

Nella fase di applicazione di queste procedure si è determinato un valore della trasformata Box-Cox che stabilizza la varianza nell'ambito sia dei bacini principali che dell'intera regione. Infatti, raggruppando tutte le varianze dei dati trasformati con indice generico λ , e valutandone la dispersione rispetto alla media pesata si ottengono i diagrammi delle Figg. 3-13. Da essi risulta abbastanza evidente che per $\lambda=1/3$ si raggiunge il requisito di minima dispersione dei dati di varianza intorno alla media (si è preferito far riferimento al valore $\lambda=1/3$ piuttosto che a $\lambda=0.3$ per comodità d'uso, senza con questo inficiare il risultato appena esposto). L'esponente $\lambda=1/3$ è lo stesso individuato come ottimale nell'analisi condotta da *Rossi e Silvagni (1980)* su oltre 20 serie di dati di deflusso annuo di corsi d'acqua dell'Italia meridionale.

I dati utilizzati per il test sono riportati in Tab. 7, ove per confronto sono anche mostrate le varianze dei dati non trasformati. Per il bacino del Noce si è invece riportato il solo dato relativo a $s(D)$, in quanto i deflussi di questo bacino sono da ritenere distribuiti secondo la legge *normale*, cosa che emerge dall'applicazione di test statistici di adattamento sui relativi dati. In Tav. 2 sono mostrati i limiti delle zone omogenee rispetto alla scelta della trasformata.

Il valore medio pesato su tutta la regione (escluso il Noce) della varianza dei deflussi trasformati con la radice cubica è pari a 1.014 e corrisponde al valore del parametro da usare nei bacini in cui ci si trovi in completa assenza di dati. Laddove è presente una serie storica sufficientemente lunga è invece il caso di usare la varianza direttamente osservata. Quando si deve assegnare il valore del parametro a bacini sottesi da sezioni diverse nell'ambito di uno stesso bacino principale ci si può trovare nella condizione di un'esistenza di dati in bacini esterni ed interni a quello di interesse. In questo caso può essere vantaggioso affinare l'analisi di stabilità della varianza facendo riferimento ad una zona di dimensioni ridotte rispetto a quella regionale, ove vi siano due o più stazioni di misura.

Effettuando questa suddivisione nella regione considerata, si sono ottenuti valori di varianza significativamente stabili in tre dei bacini principali della Basilicata (Bradano, Basento, Agri). I risultati ottenuti in questi bacini sono mostrati nelle Figg. 14-16 mentre i relativi valori di varianza sono desumibili dal prospetto più avanti riportato. In Tav. 3 sono tracciati i limiti geografici di queste zone omogenee 'ridotte'. La zona 4 della Tav. 3 è quella alla quale corrisponde il dato di varianza 'regionale', ottenuto usando i dati di tutte le stazioni.

Zona omogenea (Tav. 3)	1	2	3	4	5	6	7
$var(D^{1/3})$	0.400	1.123	1.023	1.014	0.685	0.863	
$var(D)$							93956
$s(D^{1/3})$	0.633	1.060	1.012	1.007	0.828	0.929	
$s(D)$							306.52

2.4. Stima del valore medio dei deflussi nella stagione secca

L'applicazione delle metodologie di analisi regionale descritte al *par.* 1.2.2 ha condotto alla determinazione delle leggi correlative che legano la variabilità, da sito a sito, del valore medio annuo del deflusso nella stagione secca, d_m , rispetto al deflusso medio annuo D_m .

Si sono individuate le seguenti le relazioni:

$$d_m = 0.031 D_m^{1.419} \quad (24)$$

$$d_m = 0.014 D_m^{1.419} \quad (25)$$

la prima valida per i bacini *in sinistra* Bradano, la seconda con validità estesa a tutti i bacini della regione (si veda la rappresentazione dei limiti delle zone omogenee in Tav. 4).

In Fig. 17 è mostrato l'adattamento della legge di regressione (25) ai dati di tab. 8 relativi all'intera regione, escluse le sezioni 1 e 2. L'esclusione di queste due stazioni è dovuta all'insufficiente numero di dati nel caso del Sagliocchia ed ai dubbi sollevati al *par.* 2.2 sulla possibilità di pervenire ad un corretto bilancio idrologico per il Bradano a Tavole Palatine in presenza di probabili perdite per carsismo a valle di S. Giuliano.

Per dare una migliore approssimazione al risultato di fig. 17 con riferimento alla zona di sinistra Bradano, caratterizzata da una buona omogeneità geologica per la presenza delle formazioni carbonatiche delle Murge, si sono utilizzati i dati relativi alla sezione della diga sul Basentello, raccolti dall'Ente per l'Irrigazione di Puglia e Basilicata. Questi mostrano, coerentemente con la struttura geologica del bacino, che la percentuale di deflusso stagionale rispetto a quello annuo è superiore a quella riscontrabile negli altri bacini della regione.

Per estendere a tutti i bacini in sinistra Bradano questa peculiarità si è sfruttato l'esponente della relazione (25), ottenuto su base regionale, e si è fatta passare la retta (in scala bilogarithmica)

per il punto corrispondente alla coppia di dati del Basentello (v. Fig. 17).

2.5. Stima della varianza e della trasformata di Box - Cox per i deflussi della stagione secca

La stagione secca è stata assunta come il periodo nel quale le portate sono mediamente inferiori al valor medio calcolato su base annua. Nell'area oggetto di questo studio, tale stagione è stata determinata come pari al periodo Maggio-Ottobre. Con riferimento a questo periodo sono stati quindi calcolati i valori di media e varianza del deflusso fluviale nelle stazioni si misura del SIMN (Tabelle 8-9) e si è proceduto all'applicazione delle procedure di analisi statistica regionale.

In analogia a quanto descritto nel *par.* 2.3, la scelta della trasformata da applicare alla distribuzione normale è avvenuta raggruppando tutti i dati di varianza dei dati trasformati con indice generico λ , e valutandone la dispersione rispetto alla media pesata. I dati utilizzati per il test sono riportati in Tab. 9, ove per confronto sono anche mostrate le varianze dei dati non trasformati. Si sono così ottenuti i diagrammi riportati nelle Figg. 19-29.

Dall'osservazione dei grafici risulta ancora una volta evidente che per $\lambda=1/3$ si raggiunge il requisito di minima dispersione dei dati di varianza intorno alla media. E' importante notare che in questo caso non è necessario differenziare l'indice della trasformata nella zona 7, in quanto i valori relativi alla stagione secca non risentono dei meccanismi climatici (precipitazioni nevose) che riducono la variabilità nel caso dei deflussi annui.

Il dato di varianza di $d^{1/3}$ ottenuto su base regionale è suscettibile anche in questo caso di ulteriore approfondimento se si richiede la valutazione di $s(d)$ in sezioni diverse nell'ambito di uno stesso bacino principale. Raggruppando i dati per singoli bacini principali, così come fatto per il caso delle varianze dei deflussi annui, si sono così ottenuti i risultati mostrati nelle Figg. 30 - 32.

In perfetta analogia con quanto descritto al *par.* 2.3 si riportano nel prospetto che segue i dati di varianza di $d^{1/3}$ caratteristici delle zone 'ridotte', che sono le stesse mostrate in Tav. 3 nel caso precedente. Anche qui la zona 4 corrisponde all'area a cui viene attribuito il valore 'regionale', ottenuto come media pesata di $s(d^{1/3})$ usando i dati di tutte le stazioni

Zona omogenea (Tav. 3)	1	2	3	4	5	6	7
$var(d^{1/3})$	0.241	0.510	0.564	0.505	0.403	0.391	0.449
$s(d^{1/3})$	0.491	0.714	0.751	0.711	0.635	0.625	0.670

3. DISPONIBILITÀ DI RISORSA IDRICA SUPERFICIALE IN BASILICATA

3.1. Selezione delle sezioni di interesse e stima degli afflussi ai bacini idrografici

A seguito di una preliminare individuazione delle politiche di piano di utilizzazione delle acque oggi più accreditate (Agostiano, 1991, Sabato, 1991a, 1991b) sono state selezionate 34 sezioni fluviali di maggior interesse, comprensive di quelle nelle quali già esiste un'opera di utilizzazione e di quelle nelle quali le opere sono in esecuzione o solo ipotizzate. A queste sono state aggiunte le 16 sezioni sede di stazioni idrometriche del SIMN, considerate in quanto coperte da registrazioni idrometriche. L'elenco delle sezioni di interesse è riportato in Tab.10, unitamente ai dati caratteristici dei bacini da esse sottese.

In conformità alla procedura descritta al *par. 2.1*, per tutte le stazioni pluviometriche considerate sono stati individuati i relativi topoi (si veda la Carta n. 4 in scala 1:250.000), tramite i quali si sono calcolati i valori di afflusso medio annuo ai bacini di interesse (Tab. 11). Un ulteriore risultato di queste elaborazioni è riportato in nella Carta n.5, dove sono rappresentate le curve isoiete medie sull'intera zona di indagine.

3.2. Deflussi annui per fissato rischio di deficit nelle sezioni di interesse

In questo paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti utilizzando le metodologie precedentemente esposte per la valutazione delle risorse idriche e la loro applicazione al caso della Basilicata. In particolare vengono spiegati, nel dettaglio, i ragionamenti e le analisi che hanno condotto alla stima, per ciascuna sezione di interesse, delle seguenti grandezze, significative ai fini della pianificazione delle acque:

- D_m : deflusso medio annuo;
- D_T : deflusso annuo corrispondente ad un prescelto periodo di ritorno T o, equivalentemente, D_R : deflusso annuo corrispondente ad un rischio annuale di non raggiungimento (rischio di deficit) pari ad R ;
- $D_{R,N}$: deflusso annuo corrispondente ad un rischio R di non raggiungimento una volta in N anni;

Come detto in precedenza con riferimento ai deflussi medi annui, le stime delle grandezze sopraelencate saranno da intendersi come valori relativi alla somma dei deflussi superficiali e degli apporti sorgentizi relativi ad afflussi interni ai bacini.

Gli apporti sorgentizi extra-bacino, tali cioè da influenzare decisamente la legge di

trasformazione afflussi-deflussi, potranno essere valutati con analogo dettaglio attraverso l'analisi di serie storiche affidabili di dati di portate sorgentizie - al momento non disponibili - o con studi idrogeologici di dettaglio.

Una stima indiretta di tali apporti è stata comunque effettuata calcolando la differenza tra il valore osservato di D_m ed il corrispondente valore stimato tramite la legge regionale di correlazione con l'afflusso A_m (Eq. 22-23). I valori di queste stime indirette sono riportate nei paragrafi successivi.

Nei seguenti paragrafi verranno forniti, bacino per bacino, i valori dei deflussi annui per assegnato rischio di deficit. In particolare si farà riferimento alle seguenti grandezze, le cui stime sono complessivamente riassunte in Tab. 12:

- D_m : valore medio del deflusso annuo, da prendere a riferimento per una valutazione globale delle disponibilità idriche del bacino;
- $D_{0.20}$, $D_{0.10}$ e $D_{0.05}$: valori del deflusso annuo corrispondenti, rispettivamente ad un rischio di deficit del 20%, del 10% e del 5%. Questi valori, a nostro parere, non sono molto significativi in un'ottica di pianificazione in quanto essi corrispondono ad un rischio di deficit troppo elevato se rapportato a programmi di utilizzazione a medio termine. In una durata di 10 anni, ad esempio, il primo corrisponde ad un rischio di deficit del 200% (probabilità di deficit di 2 volte in 10 anni), il secondo ad un rischio di deficit del 100% (probabilità di deficit di una volta in 10 anni) ed il terzo ad un rischio di deficit del 50% (probabilità di deficit di una volta in 20 anni). Essi possono comunque risultare utili per disegnare scenari di crisi e pianificare gli interventi necessari per farvi fronte.
- $D_{0.20,10}$: valore del deflusso annuo corrispondente ad un rischio di deficit in 10 anni pari al 20%, che sembra il valore più adatto ad essere preso a riferimento per il dimensionamento di nuove opere di utilizzazione;
- $D_{0.05,10}$: valore del deflusso annuo corrispondente ad un rischio di deficit del 5% in 10 anni. Questo valore è, di norma, molto più basso del deflusso medio annuo e può essere assunto a caratterizzare, ai fini tecnici, il minimo valore di deflusso possibile.

3.2.1. BACINI DEL BRADANO

I bacini idrografici che convogliano le loro acque nel Bradano mostrano un comportamento omogeneo per quanto riguarda la stima dei valori medi D_m del deflusso annuo, così come per quel che concerne l'esponente λ (pari ad 1/3) della trasformata di Box-Cox che conduce alla normalità la distribuzione di entrambe le suddette variabili (si vedano le Tavv. 1 e 2).

Con riferimento alla legge di trasformazione afflussi-deflussi (Eq. 22) utilizzata per la stima di D_m , i sottobacini del Bradano si differenziano dai restanti bacini del versante jonico della Basilicata. A differenza di questi ultimi, infatti, essi presentano, per effetto di un clima più arido che tende ad esaltare i fenomeni di evapotraspirazione, deflussi leggermente minori a parità di afflussi meteorici.

D'altra parte, i bacini bradanici mostrano un comportamento non omogeneo, all'interno del bacino principale, con riferimento alla varianza del deflusso. In effetti, i bacini in sinistra Bradano, rappresentati nella Zona Omogenea 1 in Tav. 3, presentano valori di deflusso annuo D che oscillano intorno al loro valore medio con varianze decisamente più basse rispetto al valore medio regionale, principalmente per effetto della struttura geologica più permeabile, prevalentemente calcarea, delle pendici delle Murge. Il dato di varianza relativo ai deflussi annui di questa zona è stato assegnato basandosi sui dati della stazione del Sagliocchia ad Acquafredda e su quelli registrati dall'Ente Irrigazione alla diga del Basentello. Per questi ultimi, descritti in Appendice 1, si rileva che i deflussi annui trasformati con $\lambda = 1/3$ presentano varianza pari a $0.392 \text{ mm}^{2/3}$.

In relazione ai dati di apporto idrologico alla diga del Basentello, meno affidabile del valore della varianza sembra quello della media, pari a 33.2 mm , che certamente risente del fatto che i dati osservati sono in parte relativi ad un periodo particolarmente siccitoso. Pertanto, per attribuire il valor medio del deflusso annuo alla sezione della diga, si è preferito far ricorso ai risultati dell'analisi regionale, di cui al *par. 2.2*, piuttosto che usare il dato misurato, considerato non rappresentativo dei valori che mediamente potranno verificarsi in futuro. Una verifica basata sul confronto tra i dati osservati alla diga ed i 40 anni della serie storica degli afflussi meteorici al bacino del Bradano a Tavole Palatine (dagli Annali Idrologici - Parte I) ha fornito una sostanziale conferma del valor medio stimato.

I restanti sottobacini del Bradano, che ricadono tra l'altro nella parte più impermeabile dell'intera regione, presentano invece varianze più elevate e significativamente omogenee tra loro (v. Zona Omogenea 2 nella Tav. 3). Non si rilevano, infine, apporti sorgentizi da fuori bacino.

I valori caratteristici dei deflussi annui, in mm , per fissato rischio di deficit sono riportati in Tab. 12.

3.2.2. BACINI DEL BASENTO

Come risulta dalle Tavv. 1-4, i bacini del Basento presentano un comportamento omogeneo rispetto alla distribuzione di probabilità, sia per i deflussi annui che per quelli relativi alla

stagione secca.

Dalle valutazioni fatte in merito alle deviazioni dalla relazione afflussi-deflussi, è stato stimato un contributo al deflusso, proveniente da precipitazioni esterne al bacino, dell'ordine di 4 Mm³ annui, che risulta significativo nei bacini montani con chiusura sull'asta principale.

I dati di deflusso mensile registrati dall'Ente Irrigazione alla diga del Camastra, e descritti in Appendice 1, sono stati ritenuti significativi per la stima della varianza dei deflussi annui e nella stagione secca nella relativa sezione del corso d'acqua.

I valori caratteristici dei deflussi annui per fissato rischio di deficit sono riportati in Tab. 12.

3.2.3. BACINI DEL CAVONE

Per l'intero bacino si può ipotizzare un comportamento omogeneo di tutti i parametri della distribuzione. I valori caratteristici dei deflussi annui per fissato rischio di deficit, interamente desunti dall'applicazione dei metodi di analisi regionale, sono riportati in Tab. 12.

3.2.4. BACINI DELL'AGRI

Il bacino idrografico dell'Agri presenta, nella sua parte più alta la zona più permeabile dell'intero versante jonico, tra l'altro ricca di sorgenti con deflussi molto consistenti. A causa dell'effetto regolatore dei deflussi sorgentizi, l'intero bacino, ad eccezione degli affluenti della media e bassa valle, presenta deflussi annui decisamente poco variabili.

Un folto gruppo di sorgenti dell'alta valle restituisce al bacino cospicui afflussi, di poco inferiori ai 50 Mm³ annui, esterni al bacino stesso. Questa quantità contribuisce in maniera significativa al volume di deflusso annuale in tutta l'alta valle dell'Agri e rappresenta un'aliquota significativa del deflusso totale, fin quasi alla sezione di Tarangelo.

Il coefficiente λ della trasformata di Box-Cox, che riduce alla distribuzione *normale* i deflussi, sia annui sia della stagione secca, è pari ad 1/3, come nella maggioranza dei bacini della regione.

I dati di deflusso mensile registrati dall'Ente Irrigazione alla diga del Pertusillo e riportati in Appendice I, sono stati ritenuti significativi per la stima della varianza dei deflussi nella relativa sezione del corso d'acqua.

I valori caratteristici dei deflussi annui per fissato rischio di deficit sono riportati in Tab. 12.

Il fatto che la valutazione delle risorse idriche effettuata in questo studio sia strettamente riferita all'insieme dei deflussi dovuti a precipitazioni interne al bacino idrografico determina sensibili modificazioni al quadro delle disponibilità note per il bacino dell'Agri. Infatti, la

considerazione che le risorse idriche provenienti da afflussi extra-bacino siano di fatto tutte sorgentizie e pertanto di notevole interesse per le captazioni ad uso potabile (e quindi non più ritrovabili in misure effettuate alle sezioni di interesse) non vale in senso stretto per l'Agri, principalmente in ragione della loro ragguardevole entità.

Ciononostante, si ritiene comunque utile porre il massimo di attenzione sulle risorse superficiali "garantite", che sono quelle indicate nelle tabelle 12 e 13 (così come nei bilanci di schema della Parte II), fermo restando che i dati osservati alle sezioni di misura del SIMN (Le Tempe, Grumento, Tarangelo) ed alla diga del Pertusillo (Tab. 21) forniscono, in termini di valor medio, le quantità di riferimento che comprendono i suddetti apporti extra-bacino.

In conseguenza della scelta effettuate, i confronti più avanti mostrati con altri studi precedentemente svolti in Basilicata potranno applicarsi per tutti i bacini considerati eccetto quelli dell'alto e medio Agri.

3.2.5. BACINI DEL SINNI

Il bacino del Sinni mostra, per quanto riguarda la stima del deflusso medio annuo, la stima del valore medio del deflusso della stagione secca e la stima dell'esponente λ della trasformata di Box-Cox per entrambe le grandezze, un comportamento omogeneo a quello della maggioranza dei bacini della regione.

Con riferimento alla varianza, invece, questo bacino ha posto alcune difficoltà interpretative. Infatti, come segnalato in Appendice I, l'unica serie di dati utilizzabile per una stima attendibile di questo parametro è risultata quella registrata a Valsinni, che mostra una varianza leggermente più bassa di quella regionale. A questa varianza occorre dar credito per la numerosità della serie e per l'apparente bontà della scala di deflusso della sezione di misura. Essa, tra l'altro può anche giustificarsi con l'effetto dei contributi sorgentizi dell'alta e media valle del bacino. La varianza stimata a Valsinni non può estendersi, però, all'intero bacino, non avendo informazioni di maggior dettaglio che consentano di differenziare quest'ultimo, per tutta la sua estensione, dal resto della regione. Si è ritenuto, pertanto, di utilizzare il valore di Valsinni per le sezioni di interesse poste poco a monte o poco a valle di esso lungo l'asta del Sinni (Zona 6), ed il valore regionale (Zona 4) per le sezioni di interesse della restante parte del Bacino.

Non sono stati ritenuti affidabili i dati registrati dall'Ente Irrigazione alla diga di Monte Cotugno, in quanto, per effetto del basso grado di riempimento spesso verificatosi all'invaso, questi dati potrebbero risultare molto influenzati da errori di valutazione della curva dei volumi di invasore. Questi dati sono comunque descritti in Appendice I.

I valori caratteristici dei deflussi annui per fissato rischio di deficit sono riportati in Tab. 12.

3.2.6. BACINI DEL NOCE

Il bacino idrografico del Noce mostra diverse specificità che lo differenziano dai bacini lucani del versante jonico.

La prima di esse riguarda le modalità, descritte al *par. 2.2*, con le quali il deflusso medio annuo varia in funzione dell'afflusso medio annuo.

Analogamente, come accennato al *par. 2.3*, i deflussi di questo bacino, a differenza degli altri della regione, risultano distribuiti secondo la *legge normale* e non secondo la *legge normale delle radici cubiche*. Questo può essere attribuito all'effetto delle nevi del Monte Sirino che, con la loro presenza molto irregolare da un anno all'altro, tendono ad aumentare la variabilità dei deflussi, riducendo le caratteristiche di asimmetria della loro distribuzione.

I valori caratteristici dei deflussi annui per fissato rischio di deficit sono riportati in Tab. 12.

3.2.7. BACINI DEL SELE RICADENTI IN REGIONE

Per questi bacini, in mancanza di osservazioni dirette di portata, vista l'analogia strutturale con gli adiacenti bacini della parte alta del versante jonico, la stima dei parametri caratteristici della distribuzione dei deflussi annui e dei deflussi della stagione secca è stata ottenuta estendendo ad essi i risultati dell'analisi regionale di cui si è detto al *cap. 2*.

I valori caratteristici dei deflussi annui per fissato rischio di deficit sono riportati in Tab. 12.

3.3. Deflussi nella stagione secca per fissato rischio di deficit nelle sezioni di interesse

In sede di analisi regionale sono state precisati i criteri di scelta della distribuzione di probabilità dei deflussi nella stagione secca, intesa come il periodo in cui i deflussi mensili risultano mediamente inferiori alla media effettuata sull'arco dei 12 mesi. Dai dati analizzati in questo studio risulta che la stagione secca può essere considerata come compresa nel periodo maggio-ottobre.

Si sono inoltre specificati, con riguardo alle sezioni per le quali non sono disponibili dati idrometrici, i valori da assegnare alla varianza dei dati trasformati (con la radice cubica) e le relazioni che consentono la stima del valor medio del deflusso stagionale in funzione del valor medio del deflusso annuo. Tenendo poi conto che i parametri relativi alle sezioni provviste di

un numero sufficiente di dati idrometrici (>5 anni) sono direttamente calcolati da essi, si sono forniti tutti gli elementi utili alla determinazione dei valori di deflusso stagionale disponibili, alle sezioni, con assegnato rischio di deficit.

Le elaborazioni effettuate hanno condotto alla stima, per ciascuna sezione di interesse, delle seguenti grandezze:

- d_m : valore medio del deflusso nella stagione secca;
- d_T : deflusso nella stagione secca corrispondente ad un prescelto periodo di ritorno T o, equivalentemente, d_R : deflusso nella stagione secca corrispondente ad un rischio annuale di non raggiungimento (rischio di deficit) pari ad R ;
- $d_{R,N}$: deflusso nella stagione secca corrispondente ad un rischio R di non raggiungimento una volta in N anni;

Le stime delle grandezze sopra elencate saranno da intendersi come valori relativi alla somma dei deflussi superficiali e degli apporti sorgentizi.

In Tab. 13 sono complessivamente riassunti i seguenti valori caratteristici delle grandezze sopra richiamate:

- d_m : valore medio del deflusso nella stagione secca, da prendere a riferimento per una valutazione delle disponibilità idriche del bacino con riguardo al periodo irriguo;
- $d_{0,20}$, $d_{0,10}$ e $d_{0,05}$: valori del deflusso nella stagione secca corrispondenti, rispettivamente ad un rischio di deficit del 20%, del 10% e del 5%.
- $d_{0,20,10}$: valore del deflusso nella stagione secca corrispondente ad un rischio di deficit in 10 anni pari al 20%.
- $d_{0,05,10}$: valore del deflusso nella stagione secca corrispondente ad un rischio di deficit del 5% in 10 anni; questo valore può essere assunto a caratterizzare, ai fini tecnici, il minimo valore di deflusso possibile nel periodo estivo.

Le peculiarità emerse in singoli bacini nell'ambito dell'applicazione delle citate procedure sono commentate di seguito.

3.3.1. Peculiarità emergenti per i diversi bacini

Il bacino del Bradano e quello del Noce sono gli unici a presentare differenziazioni nel tipo di distribuzione di probabilità tra il deflusso annuo e quello nella stagione secca.

Con riferimento al Bradano, non vi è infatti omogeneità nell'ambito del bacino se non con riferimento all'esponente λ della trasformata di Box-Cox. Infatti, sia per quanto riguarda la

determinazione della relazione esistente tra valori medi D_m e d_m del deflusso annuo e di quello nella stagione secca, che per la stima della varianza di d , si rende necessaria una differenziazione tra sottobacini posti in sinistra e quelli posti in destra.

Nel caso della relazione tra le medie, in sinistra Bradano è infatti valida la relazione (24), mentre per gli altri bacini vale quella (eq. 25) relativa all'insieme degli altri bacini regionali. La varianza della trasformata $1/3$ dei deflussi nella stagione secca è anch'essa condizionata dalla posizione dei sottobacini, differenziandosi per quelli in sinistra con un valore medio di $0.241 \text{ mm}^{2/3}$, ancora stimato in base ai dati del Sagliocchia e della diga del Basentello. In conseguenza della rivalutazione della media dei deflussi annui in entrata alla diga del Basentello se ne è rivalutato anche il deflusso medio stagionale, in conformità alla relazione (24), la cui intercetta è peraltro basata sul rapporto d_m/D_m osservato proprio sui dati relativi alla diga.

Per quanto riguarda i dati del fiume Noce, le specificità che li differenziano da quelli degli altri bacini lucani del versante jonico alla scala annua si attenuano quando si prendono in considerazione i deflussi della stagione secca. Essi risultano infatti distribuiti secondo la *legge normale delle radici cubiche*, così come quelli dei bacini del versante jonico.

4. CONFRONTO CON STUDI PRECEDENTI

I risultati ottenuti in questo studio possono essere facilmente confrontati con quelli scaturiti dai due più recenti studi sulle risorse idriche della Basilicata, citati in introduzione, coordinati rispettivamente dai Proff. Carlo Viparelli (*STCV*, 1981) ed Antonio Di Santo (1989).

Tali contributi differiscono dal presente lavoro sia per le diverse metodologie di indagine adottate, sia per il maggior numero di dati qui disponibili, tra l'altro fortemente significativi in quanto comprendenti le misurazioni pluviometriche relative al periodo siccitoso verificatosi sul finire degli anni '80.

Il confronto, presentato nelle Tab. 14 - 16, offre spunti per alcune considerazioni riportate nei paragrafi che seguono.

4.1. Confronto con lo studio del Prof. C. Viparelli

Nello studio del Prof. Viparelli (*STCV* 1981), il deflusso medio annuo D_m è stato stimato attraverso una correlazione con l'afflusso medio annuo A_m , utilizzando un'approssimazione polinomiale del tipo

$$D_m = A_m - c A_m^{0.466} \quad (26)$$

dove c è un coefficiente che può assumere due valori a seconda che il bacino sia classificato come impermeabile o permeabile (rispettivamente con meno o più dell' 1.5% di parte permeabile). La (26) è rispettosa del fatto che l'evapotraspirazione tende a diminuire all'aumentare di A_m , essa pertanto, ben tarata, forniva risultati affidabili all'interno di bacini per i quali si disponeva di dati per la calibrazione. L'introduzione, però, di un effetto soglia per la valutazione della costante c comporta un'eccessiva differenziazione tra bacini con permeabilità leggermente maggiore e leggermente minore del 1.5%, in particolare in quei casi in cui la permeabilità è stata stimata unicamente in base a considerazioni di carattere geologico, senza il supporto dell'informazione idrologica.

Nello stesso studio, i valori dei deflussi annui per fissato rischio di deficit sono stati stimati nell'ipotesi di validità della distribuzione log-normale che, come mostrato nel cap. 5, è meno idonea della distribuzione normale delle radici cubiche per l'interpretazione statistica dei deflussi annui della Basilicata. In aggiunta, è stato applicato un metodo del tutto differente per la stima della varianza in sezioni qualsiasi.

Con riferimento alla significatività del confronto è utile precisare che nello studio del Prof. Viparelli viene effettuata una differenziazione netta tra i deflussi sorgentizi e quelli dovuti al

solo scorrimento superficiale delle acque meteoriche. Ne risulta che i deflussi qui stimati vanno comparati con i deflussi totali stimati dal Viparelli.

Tutto ciò premesso, dal confronto emergono le seguenti considerazioni.

4.1.1. DEFLUSSI MEDI ANNUI

La Tab.14, relativa ai valori medi annui, permette, con riferimento ai diversi bacini, le seguenti osservazioni.

Bacini del Bradano e del Basento: i deflussi medi annui qui stimati sono generalmente più bassi, con percentuali variabili tra il 10% ed il 20%, con la sola eccezione delle sezioni di P.te Colonna sul Bradano e di Menzena sul Basento, ai cui bacini è assegnata, nello studio Viparelli, una permeabilità molto prossima al valore soglia dell'1.5%.

Bacini del Cavone: i deflussi medi annui stimati in questo studio sono sensibilmente maggiori di quelli stimati dal Prof. Viparelli, che si è basato su valutazioni appoggiate alla determinazione del parametro c della (26), mentre in questo caso la stima è basata sull'assunzione di omogeneità della relazione afflussi-deflussi tra i bacini del Basento, Cavone ed Agri-Sauro.

Bacini dell'Agri: Per quanto detto al par. 3.2.4, i deflussi medi annui qui stimati sono minori di quelli stimati dal Prof. Viparelli, in ragione inversamente proporzionale alle dimensioni del bacino considerato. Per il Sauro, che non entra nel ragionamento cui ci si è appena riferiti, vengono qui stimati deflussi medi annui significativamente maggiori di quelli valutati dal Viparelli, in analogia a quanto si è rilevato per il Cavone.

Bacini del Sinni: i deflussi medi annui qui stimati non differiscono significativamente da quelli stimati dal Prof. Viparelli, tranne che per la sezione di Monte Cotugno, nella quale viene qui stimato un valore del 10% inferiore.

Bacini del Noce: le stime sono sostanzialmente coincidenti.

Sottobacini del Sele qui Considerati: i deflussi medi annui stimati qui sono del 10% maggiori.

4.1.2. DEFLUSSI CORRISPONDENTI AD ASSEGNATO RISCHIO DI DEFICIT

I dati necessari per questo confronto sono riportati nella Tab. 15. Ai fini comparativi, viene scelto, come valore del rischio di deficit, quello corrispondente al 5% in 10 anni. I valori con questo rischio di non raggiungimento possono infatti essere considerati come quei deflussi ai quali corrisponde una probabilità di deficit trascurabile ai fini tecnici.

Dal confronto dei valori stimati si evince che i valori dei deflussi corrispondenti a fissato rischio di deficit stimati dal Prof. Viparelli risultano quasi ovunque più elevati di quelli stimati in questo studio. Al di là delle differenze di impostazione nei metodi dell'analisi regionale, a

giustificazione di questo risultato si può considerare che in questo studio non sono stati esplicitamente considerati i deflussi sorgentizi.

In conclusione, con riferimento alle sezioni di chiusura dei principali bacini qui considerati, in questo studio emerge che la disponibilità di deflussi annui corrispondenti ad un rischio di deficit del 5% in 10 anni, è di circa il 35% inferiore a quella stimata nello studio Viparelli.

4.2. Confronto con lo studio del Prof. A. Di Santo

Il confronto con questo studio è significativo solo con riferimento ai valori medi dei deflussi annui, non essendo stata ivi esplicitamente stimata la distribuzione di probabilità dei deflussi annui.

Per la stima del deflusso medio annuo D_m , il Prof. Di Santo ha usato il criterio della proporzionalità tra afflussi e deflussi, ritenuto valido all'interno di zone per le quali era risultato possibile stimare il coefficiente di deflusso (rapporto tra A_m e D_m) dai dati idrologici disponibili. Questo criterio, per la sua inosservanza della non linearità del fenomeno di trasformazione afflussi - deflussi alla scala annua, può risultare talvolta eccessivamente semplificato per stimare D_m in sezioni lontane da quelle prese a riferimento per valutare il coefficiente di deflusso.

Ciò premesso, dal confronto di Tab. 16 emerge che i valori di D_m stimati con questa perizia sono generalmente inferiori a quelli prodotti dallo studio Di Santo, con percentuali spesso superiori al 20% e con punte che raggiungono il 40%. Questa marcata differenza è da attribuire, oltre che alle suddette motivazioni, alla maggiore informazione pluviometrica oggi disponibile, comprensiva, tra l'altro, dei dati relativi al recente periodo siccitoso.

VALUTAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE

1. ASPETTI TEORICI.....	1
1.1. CENNI DI PROBABILITÀ E STATISTICA APPLICATE ALLO STUDIO DEI DEFLUSSI SUPERFICIALI.....	1
1.1.1. <i>Definizione di variabile casuale</i>	1
1.1.2. <i>Definizione di distribuzione di probabilità</i>	2
1.1.3. <i>La stima dei parametri della distribuzione</i>	5
1.1.4. <i>Alcuni esempi di distribuzioni di probabilità di variabili idrologiche</i>	6
1.1.5. <i>Le tecniche di stima dell'esponente della trasformata di Box - Cox</i>	7
1.2. I MODELLI DI REGIONALIZZAZIONE DEI DEFLUSSI SUPERFICIALI.....	9
1.2.1. <i>la stima del deflusso medio annuo</i>	9
1.2.2. <i>la stima del valore medio dei deflussi nella stagione secca</i>	11
2. TARATURA DEI MODELLI DI REGIONALIZZAZIONE	12
2.1. STIMA DEL VALORE MEDIO ANNUO DELLE PIOGGE AREALI (AFFLUSSI).....	12
2.2. STIMA DEL DEFLUSSO MEDIO ANNUO.....	13
2.3. STIMA DELLA VARIANZA E DELLA TRASFORMATA DI BOX -COX PER I DEFLUSSI ANNUI.....	15
2.4. STIMA DEL VALORE MEDIO DEI DEFLUSSI NELLA STAGIONE SECCA.....	16
2.5. STIMA DELLA VARIANZA E DELLA TRASFORMATA DI BOX - COX PER I DEFLUSSI DELLA STAGIONE SECCA...	17
3. DISPONIBILITÀ DI RISORSA IDRICA SUPERFICIALE IN BASILICATA	18
3.1. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI INTERESSE E STIMA DEGLI AFFLUSSI AI BACINI IDROGRAFICI.....	18
3.2. DEFLUSSI ANNUI PER FISSATO RISCHIO DI DEFICIT NELLE SEZIONI DI INTERESSE	18
3.2.1. <i>Bacini del Bradano</i>	19
3.2.2. <i>Bacini del Basento</i>	20
3.2.3. <i>Bacini del Cavone</i>	21
3.2.4. <i>Bacini dell'Agri</i>	21
3.2.5. <i>Bacini del Sinni</i>	22
3.2.6. <i>Bacini del Noce</i>	23
3.2.7. <i>Bacini del Sele ricadenti in regione</i>	23
3.3. DEFLUSSI NELLA STAGIONE SECCA PER FISSATO RISCHIO DI DEFICIT NELLE SEZIONI DI INTERESSE	23
4. CONFRONTO CON STUDI PRECEDENTI.....	26
4.1. CONFRONTO CON LO STUDIO DEL PROF. C. VIPARELLI.....	26
4.1.1. <i>Deflussi medi annui</i>	27
4.1.2. <i>Deflussi corrispondenti ad assegnato rischio di deficit</i>	27
4.2. CONFRONTO CON LO STUDIO DEL PROF. A. DI SANTO	28