

## Corso di Gestione delle Risorse Idriche

### Valutazione delle risorse idriche superficiali

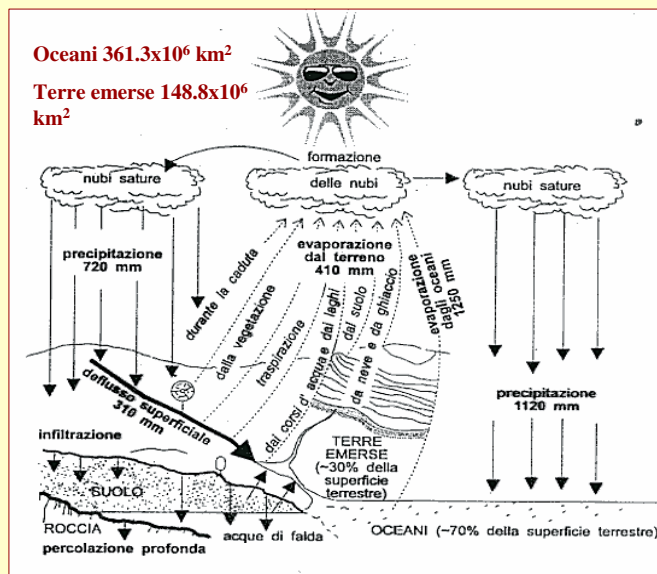


**Antonino Cancelliere**  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale  
Università di Catania  
[acance@dica.unict.it](mailto:acance@dica.unict.it)

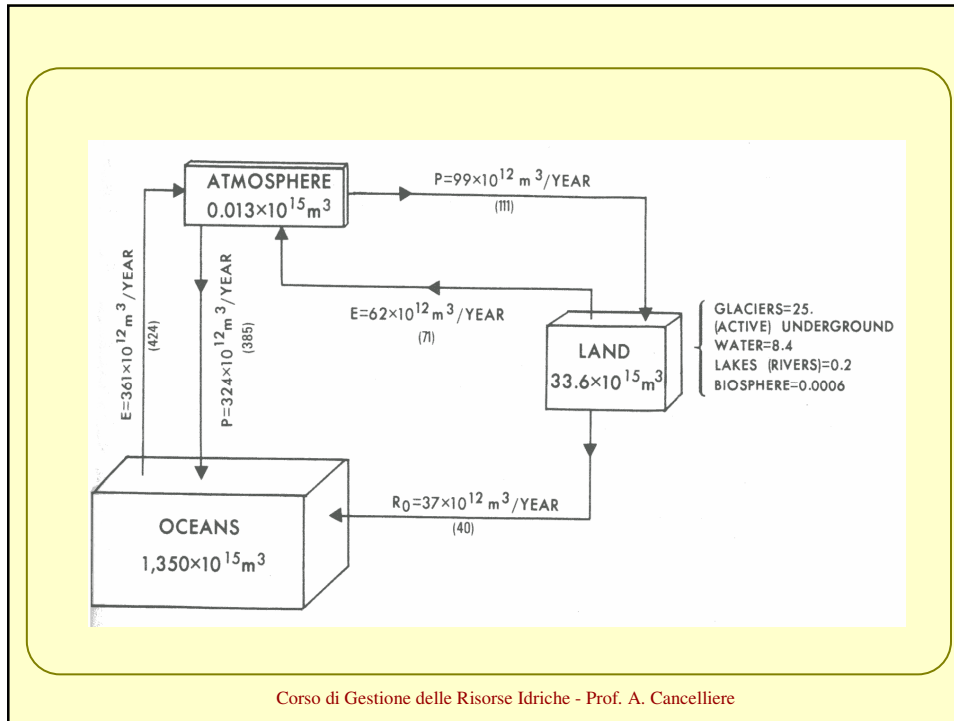
Ben sai come ne l'aere si raccoglie  
quell'umido vapor che in acqua riede,  
tosto che sale dove 'l freddo il coglie.  
Giunse quel mal voler che pur mal chiede  
con lo 'ntelletto, e mosse il fummo e 'l vento  
per la virtù che sua natura diede.  
Indi la valle, come 'l di fu spento,  
da Pratomagno al gran giogo coperse  
di nebbia; e 'l ciel di sopra fece intento,  
sì che 'l pregno aere in acqua si converse;  
la pioggia cadde e a' fossati venne  
di lei ciò che la terra non sofferse;  
e come ai rivi grandi si convenne,  
ver' lo fiume real tanto veloce  
si ruinò, che nulla la ritenne.  
*Dante, Purgatorio V, 109-123*

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Ciclo idrologico



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere



## Risorse idriche sulla terra

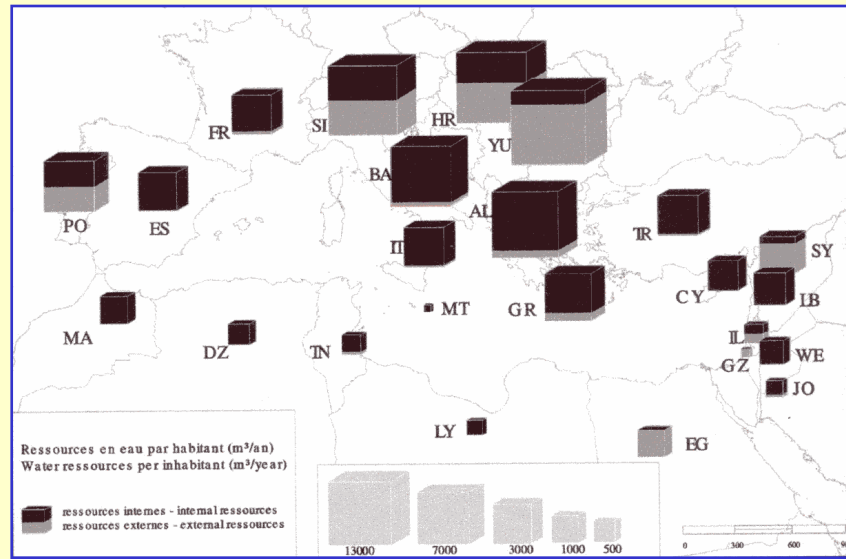
	Superficie $10^3 \text{ km}^2$	Volume $10^3 \text{ km}^3$	Altezza m	%Rispetto al totale	% Rispetto al totale di acqua dolce
Oceani	361.300	1.338.000	3.700	96,5	—
Acque sotterranee	134.800	23.400	174	1,7	—
Acque dolci	-	10.530	78	0,76	30,1
Umidità del suolo	-	16,5	0,2	0,001	0,05
Ghiacciai e nevi perenni	16.227	24.064	1.463	1,74	68,7
Antartico	13.980	21.600	1.546	1,56	61,7
Groenlandia	1.802	2.340	1.298	0,17	6,68
Isole artiche	226	83,5	369	0,006	0,24
Alta montagna	224	40,6	181	0,003	0,12
Ghiaccio a terra	21.000	300	14	0,022	0,86
Risorse nei laghi	2.058,7	176,4	85,7	0,013	—
Acqua dolce	1.236,4	91	73,6	0,007	0,26
Acqua salmastra	822,3	85,4	103,8	0,006	—
Paludi	2.682,6	11,47	4,28	0,0008	0,03
Fiumi	148.800	2,12	0,014	0,0002	0,006
Acqua biologica	-	1,12	0,002	0,0001	0,003
Acqua nell'atmosfera	-	12,9	0,025	0,001	0,04
<b>Totale</b>	<b>510.000</b>	<b>1.385.984</b>	<b>2.718</b>	<b>100</b>	<b>-</b>
<b>Totale acqua dolce</b>	<b>148.800</b>	<b>35.029</b>	<b>235</b>	<b>2,53</b>	<b>100</b>

Fonte: Shiklomanov, 1993

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

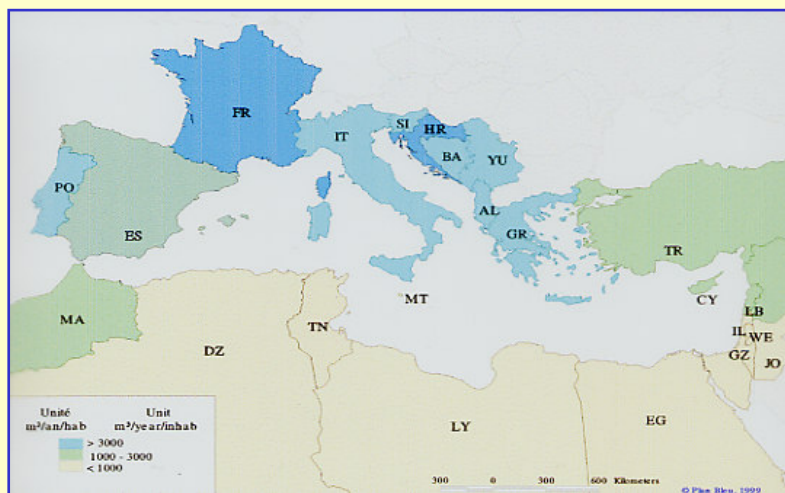


## Risorse idriche naturali pro-capite nei paesi mediterranei



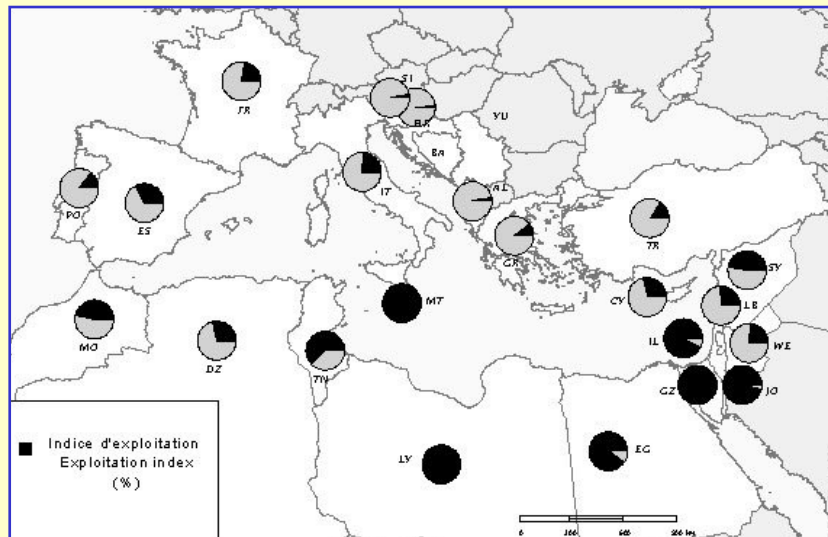
Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Suddivisione dei paesi in unità idro-geopolitiche



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Indice di sfruttamento delle risorse idriche



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Precipitazioni e risorse idriche nei paesi mediterranei (1961-1990)

Pays / Country	Précipitations / Precipitations		Ressources en eau naturelles renouvelables internes (km <sup>3</sup> /an) / Internal renewable natural water resources (km <sup>3</sup> /year)				
	mm / an / mm / an (a)	km <sup>3</sup> / an / km <sup>3</sup> / year (b)	Surface (1)	Souterraines / Groundwater (2)	Partie commune / Overlap (3)	Total (4)	Sources (1 - 4)
Espagne / Spain	636	321,7	109,5	29,9	26,2	111,2	FAO/AQUASTAT
France	867	478,	187,	100,	98,	189,	d IFEN
Italie / Italy	832	250,8	170,5	43,	31,	182,5	FAO/AQUASTAT
Malte / Malta	560	0,2	0,004	0,033	0,	0,037	d Plan Bleu Saragosse 2007
Slovénie / Slovenia	1 162	23,5	18,52	13,5	13,35	18,67	FAO/AQUASTAT
Croatie / Croatia	1 113	62,9	27,2	11,	0,5	37,7	FAO/AQUASTAT
Bosnie / Bosnia	1 028	52,6	35,5	6,	c 6,	35,5	Source Plan Bleu
Monténégro / Montenegro			15,7	3,	c 3,	c 15,7	FAO/AQUASTAT
Albanie / Albania	1 485	42,7	23,05	6,2	2,35	26,9	FAO/AQUASTAT
Grèce / Greece	652	86,1	55,5	10,3	7,8	58,	FAO/AQUASTAT
Chypre / Cyprus	498	4,6	0,56	0,41	0,19	0,78	FAO/AQUASTAT
Turquie / Turkey	593	459,5	186,	69,	28,	227,	DSI 2007
Syrie / Syria	252	46,7	4,29	6,04		10,33	d Plan Bleu Saragosse 2007
Liban / Lebanon	661	6,9	4,1	3,2	2,5	4,8	FAO/AQUASTAT
Israël / Israel	435	9,2	0,25	0,5	0,	0,75	FAO/AQUASTAT
Egypte / Egypt	51	51,4	0,5	1,3	0,	1,8	FAO/AQUASTAT
Libye / Libya	56	98,5	0,2	0,5	0,1	0,6	FAO/AQUASTAT
Tunisie / Tunisia	207	33,9	3,12	1,45	0,4	4,17	d Hamdane
Algérie / Algeria	89	211,5	10,77	1,6	c 1,	11,37	d FAO 2005
Maroc / Morocco	346	154,7	17,88	5,77	3,	c 20,65	d Plan Bleu Saragosse 2007

# Stima delle risorse idriche in Italia



## Estimations des ressources en eau Estimations of water resources



Actualisé le - updated on 31/10/2007

en km<sup>3</sup>/an - km<sup>3</sup>/yr

SOURCES	Ressources intérieures				Ressources extérieures			Ressources totales			
	surface	souterraines / groundwater	partie commune / overlap	total	surface	souterraines / groundwater	total	surface	souterraines / groundwater	total	
Dentice di Acadia, 1971 ; Fassio, 1972	138,	22,	a	160,			7,6	b		167,	
L'vovich, 1974	93,8	66,2		160,			-			-	
Bassler, Benedini, 1977 (CCE)				165,			2,			167,	
Mouton, 1990		43,					-		43,		
UN-ECE, 1981				179,4			7,6			187,	
UN-ECE, 1989				185,			2,			187,	
Plan Bleu / Margat, 1992	149,4	- 30	a	179,4	7,6	-	7,6	157,	30,	187,	
WRI, 1990-91, 1994-95				179,4	7,6	-	7,6			187,	
OCDE / OECD, 1993, 95				167,			8,			175,	
Benedini & al., 1996	155,	c	12,95	d							
Benedini/CCE, 1997	148,7	43	c	31,	160,7	6,32	-	6,32	155,02	12,	167,02
Benedini/IPS, 1997			12,95	d	-			110,42	d	12,95	123,37
FAO/QUASTAT 2003	170,5	4,3		182,5			8,8			191,3	
FAO/QUASTAT 2005				31,							
WRI, 2005										191,	

### Notes

- Négligeable
- a. dont 12 -> mer
- b. dont : 1 de France, 2 de Suisse, 4.6 de Yougoslavie (Slovénie)
- c. partie commune avec les eaux de surface = 31 km<sup>3</sup>/an
- d. "Ressources potentielles" (au sens de ressources exploitables)

### Notes

- Negligible
- a. of which 12 -> sea
- b. includes : 1 from France, 2 from Switzerland, and 4.6 from Yugoslavia (Slovenia)
- c. overlap with surface waters = 31 km<sup>3</sup>/yr
- d. "Potential water resources" (meaning exploitable resources)

# Stima delle domande idriche in Italia



## Demandes en eau (prélèvements et/ou productions) Water demands (Withdrawals and/or productions)



Actualisé le - updated on 31/10/2007

ITALIE		Prélèvements sectoriels en km <sup>3</sup> /an Withdrawal by sector in km <sup>3</sup> /year						ITALIA			
Année	Population	Prélèvement total	Collectivités	Industries non-	Agriculture	Centrales thermiques	Prélèvement par	Sources / Notes			
Year	Millions d'habitants Millions of inhabitants	Total withdrawal (km <sup>3</sup> /an) (km <sup>3</sup> /year)	Communities (drinking water)	Self-supplied industries (+ exhaure min.)	Agriculture (irrigation, husbandry)	Power stations	habitant withdrawal per capita (m <sup>3</sup> /an) (m <sup>3</sup> /year)				
1970	53,95	41,9	-	-	-	-	782	OCDE/OECD, 1985, 1989, 1993			
1970-71		36,	7,	1,5	25,8	1,94	687	Fassio, 1972; UN-ECE, 1974, 1975, CCE/CEC, 1977; WRI, 1988.			
1980	57,07	56,2	6,37	15,73	a	32,2	h	985			
1980	57,07	56,2	7,68	b	7,08	c	32,2	h	7,02	d	985
1981	57,2	40,3	6,8	6,8	32,2			54		809	Benedini, 1987; Plan Bleu J.M., 1988
1984	56,95		6,58							913	UN-ECE, 1989.
1985	56,95	52,	7,33	-	-	-				913	OCDE/OECD, 1991, 1993.
1987	57,32	56,2	7,62	7,08	c	32,2	7,02	d	980	OCDE/OECD, 1991, 1993 (e)	
1990	57,59	56,2	7,87	15,17		33,15			986	OCDE/OECD, 1995, WRI 1998-97	
1990	57,59	46,	5,8	g	6,8	g	22,9 - 28		f	781	Conf. Dublin, 1992.
1993	57,54	44,61	7,9	7,5		20,27		8,79		775	M. Benedini, CCMD, Atal Fréjus 1997
1994			6,2								M. Benedini, 1998
1995		43,09	7,94			19,74					CEDEX 2002
1996	57,27	47,88	6,05	9,14		25,58		0,51		836	R. Drušari, 1998
1998		42,	7,5 - 8			20,					stat Ambient, 2001
1998		56,2	10,12		25,85						Eurostat 2001
1998		42,	8,			20,					WRI 2004
1998		41,99	7,64		20,14						Plan Bleu Saragosse 2007

Tab. 1 - Risorse idriche disponibili in Italia (km<sup>3</sup>/anno)

Risorse	Cna, 1970	Cna, 1989
Precipitazioni (A)	296	296
Evaporazione (B)	132	132
Perdite (C)	9	9
Deflusso totale (A-(B+C))	155	155
Risorse superficiali potenzialmente disponibili (D)	110	110
Risorse sotterranee (E)	13	12
Capacità invasi esistenti	7,7	8,4
Capacità invasi in costruzione	2	2
Altri serbatoi potenzialmente realizzabili	6,5	6,5
Risorse superficiali utilizzabili (F)	42	40
Totale risorse disponibili (E+F)	55	52

Fonti: Conferenza Nazionale sulle Acque (1970); Ministero dell'Agricoltura e Foreste (1990): "I problemi delle acque in Italia", Edagricole.

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

Tab. 2 - Risorse idriche disponibili in Italia per compartimento idrografico nel 1989 (hm<sup>3</sup>/anno)

Compartimento	Precipitazioni	Risorse utilizzabili		Invasi esistenti	Sotterranee	Risorse totali
		senza reg.	con reg.			
Bacino del Po	71.800	11.374	16.118	2.194	4.468	20.586
Triveneto	42.800	4.425	10.939	1.069	1.721	12.660
Liguria	6.400	235	372	29	307	679
Romagna-Marche	20.700	299	995	212	620	1.615
Toscana	20.900	199	543	141	440	983
Lazio-Umbria	24.100	321	1.399	452	1.126	2.525
Abruzzo-Molise	11.900	621	2.454	603	248	2.702
Puglia	13.200	13	523	397	325	848
Campania	23.200	152	1.237	77	929	2.166
Calabria-Lucania	24.000	650	2.514	1.131	595	3.109
Sicilia	18.800	29	738	718	1.151	1.889
Sardegna	18.300	29	1.841	1.403	217	2.058
Italia	296.000	18.347	39.673	8.426	12.146	51.820

Fonte: Cna 1971; Cna 1989; Rusconi (1995): "L'acqua. Prospettive su risorse e utilizzo", Editoriale Verde Ambiente, Roma; e nostre elaborazioni

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

Tab. 3 - Risorse idriche disponibili in Italia per compartimento idrografico (m<sup>3</sup>/anno pro-capite)

Compartimento	Afflusso	Disponibili	Invasi esistenti	Sotterranee	Risorse totali
Bacino del Po	4.654	1.045	142	290	1.334
Triveneto	6.693	1.707	167	268	1.975
Liguria	3.557	207	16	171	377
Romagna-Marche	6.126	294	63	183	478
Toscana	5.853	152	39	123	275
Lazio-Umbria	4.173	242	78	195	437
Abruzzo-Molise	7.728	1.594	392	161	1.755
Puglia	3.429	136	103	84	220
Campania	4.290	229	14	172	400
Calabria-Lucania	9.110	954	429	226	1.180
Sicilia	3.865	152	148	237	388
Sardegna	11.854	1.161	885	137	1.298
Italia	5.273	705	150	216	921

Fonte: Cna 1971, Cna 1989 e nostre elaborazioni

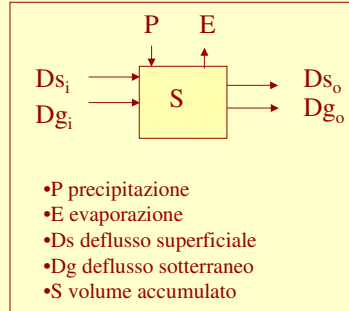
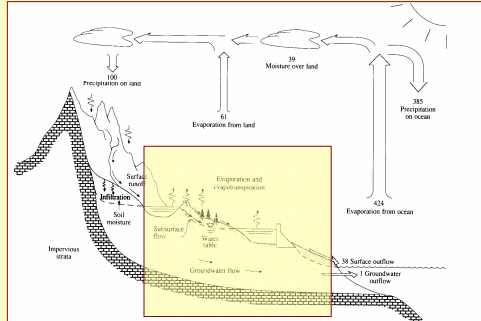
Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Modelli per la stima dei deflussi superficiali

- Le serie di deflussi in un corso d'acqua costituiscono l'informazione fondamentale per affrontare numerosi problemi ingegneristici e gestionali:
  - Dimensionamento e verifica di opere di derivazione e accumulo (serbatoi)
  - Stesura dei bilanci idrici risorse-fabbisogni
  - Analisi dei sistemi di approvvigionamento idrico
  - Taratura di modelli stocastici di generazione di serie sintetiche
- ma anche scientifici...
  - Migliore comprensione dei processi idrologici anche finalizzata allo sviluppo di modelli afflussi deflussi
  - Bilanci idrologici a scala regionale, continentale, globale
  - Analisi dei cambiamenti climatici
- La finalità dei modelli per la stima dei deflussi superficiali è quella di supplire ad una inadeguata disponibilità di osservazioni idrometriche attraverso:
  - l'estensione temporale di serie di deflussi in sezioni di corsi d'acqua
  - la ricostruzione di serie di deflussi in sezioni di corsi d'acqua sprovvisti di stazioni di misura
- Scale temporali di interesse:
  - Oraria: modelli di piena per la difesa idraulica del territorio
  - Giornaliera: dimensionamento e verifica traverse di derivazione, impianti idroelettrici ad acqua fluente, problemi di navigazione
  - Mensile: dimensionamento/verifica di serbatoi per l'approvvigionamento di diversi usi (civile, irriguo, industriale, idroelettrico), stesura di bilanci idrici risorse-fabbisogni, bilanci idrologici
  - Annuale: bilanci fabbisogni risorse, bilanci idrologici a larga scala



## Bilancio idrologico in una regione



- P precipitazione
- E evaporazione
- Ds deflusso superficiale
- Dg deflusso sotterraneo
- S volume accumulato

$$\Delta S = P - E + Ds_i - Ds_o + Dg_i - Dg_o$$

Considerando una regione ampia,  
mediando nel tempo e nello spazio:

$$\begin{array}{c} \{\Delta S\} = \{P\} - \{E\} + \{Ds_i - Ds_o\} + \{Dg_i - Dg_o\} \\ \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ \approx 0 \qquad \qquad \qquad \{Ds\} \qquad \qquad \qquad \approx 0 \end{array} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\{P\} - \{E\} = \{Ds\}}$$

## Modelli di trasformazione afflussi-deflussi

- Modelli matematici orientati a riprodurre i processi idrologici che intervengono nella trasformazione delle piogge in deflussi superficiali
- Diversa complessità in funzione di:
  - Scala temporale
  - Scala spaziale
  - Descrizione più o meno spinta dei processi fisici
  - Parametri da calibrare

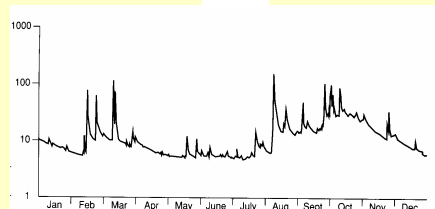
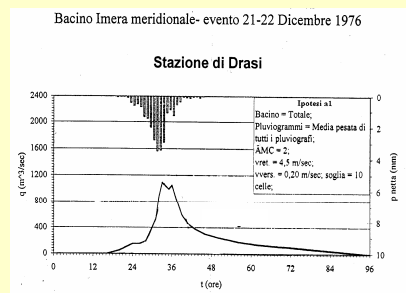
## Modelli per la valutazione dei deflussi superficiali

- **Deterministici**
  - Empirici
  - Bilancio idrologico
  - Afflussi-deflussi
    - A scatola chiusa (black box)
    - Concettuali
    - Fisicamente basati
- **Statistici**
  - Stima diretta
  - Stima indiretta (regressione)
- **Stocastici**
  - Autoregressivi
  - Autoregressivi con variabili esogene
  - Disaggregazione

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Modelli afflussi-deflussi

- **Modelli che consentono di determinare la risposta idrologica di un bacino (deflussi superficiali e/o sotterranei) in corrispondenza a input di pioggia predefiniti, attraverso la simulazione dei processi che intervengono nella trasformazione tra gli afflussi e i deflussi**
- **In generale possono essere distinti in funzione della scala temporale dei fenomeni in:**
  - Modelli di evento
  - Modelli completi



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Modelli a parametri concentrati o distribuiti

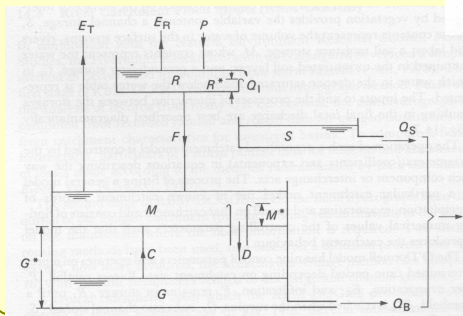
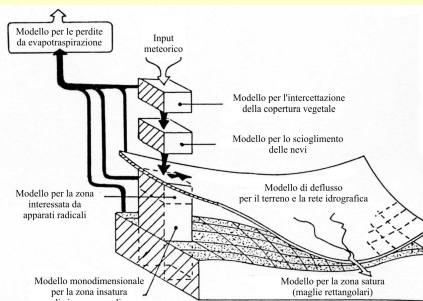
Una ulteriore distinzione può essere fatta tra:

- **Modelli a parametri concentrati (lumped)**
  - la schematizzazione dei processi idrologici avviene aggregando le informazioni su una scala spaziale piuttosto ampia (l'intero bacino o sotto-bacino)
- **Modelli a parametri distribuiti**
  - La scala spaziale di simulazione è molto più piccola (anche dell'ordine delle decine di metri), il che consente una rappresentazione più realistica della variabilità spaziale dei parametri.
  - Più onerosi da un punto di vista computazionale

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Modelli afflussi deflussi

- **Modelli distribuiti fisicamente basati**



- **Modelli concettuali a parametri concentrati**

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Modelli di trasformazione afflussi-deflussi

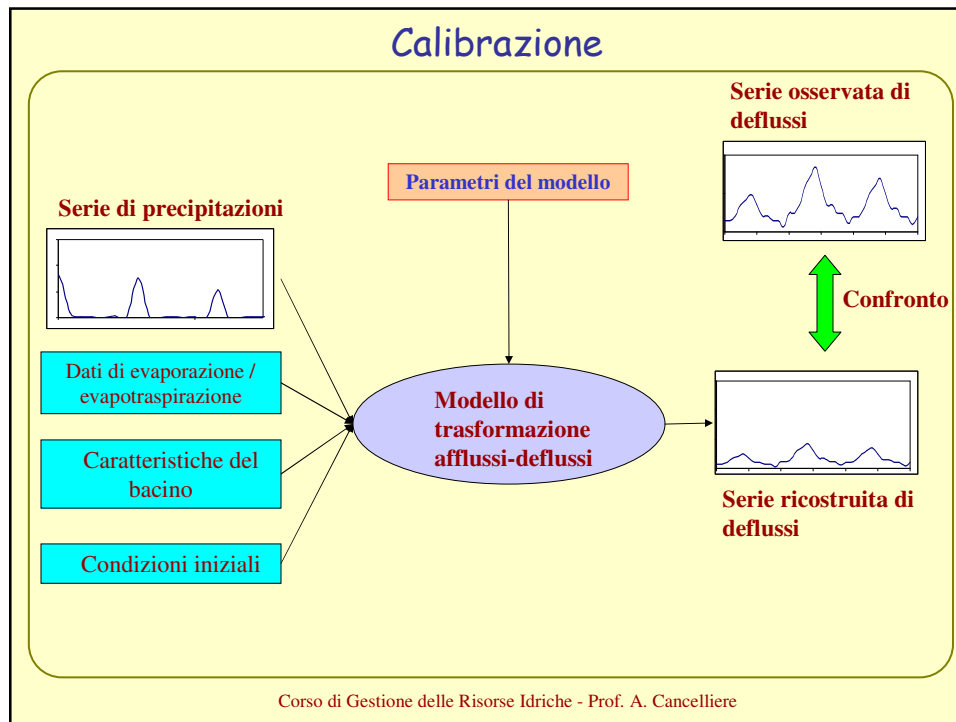
- Nello sviluppo di un modello è opportuno distinguere tra:
  - Concettualizzazione
  - Formulazione
  - Calibrazione
  - Verifica
  - Validazione (calibrazione e verifica su periodi diversi)
  - Simulazione (applicazione)

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Calibrazione dei modelli

- Da un punto di vista formale, un modello afflussi-deflussi può essere visto come uno strumento matematico che lega gli input idrologici (precipitazione, temperatura, evapotraspirazione potenziale, etc.) agli output (deflussi superficiali ma anche evapotraspirazione, contenuto idrico del terreno, ricarica della falda, deflusso sotterraneo, etc.) in funzione di uno o più parametri
- La determinazione ottimale dei parametri e delle caratteristiche dei sottobacini costituisce la cosiddetta fase di calibrazione del modello
  - Parametri di tipo fisico -> stima diretta
  - Parametri concettuali -> calibrazione sulla base della capacità del modello a riprodurre dati osservati (input e output)
- Generalmente si simula la risposta idrologica del bacino durante un periodo in cui sono disponibili osservazioni contemporanee di precipitazioni (input) e deflussi (output) e si confrontano i deflussi simulati con quelli osservati
- Per effettuare la calibrazione è necessario un criterio per misurare l'adeguatezza del modello a simulare le grandezze osservate

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere



### Confronto tra deflussi osservati e simulati

- Il confronto può essere di tipo:
  - Grafico
  - Numerico attraverso il calcolo di opportuni indici
- Tra gli indici che possono essere utilizzati:

$\sum_{t=1}^n (\hat{Q}_t - Q_t)^2$	Somma dei quadrati degli errori
$\sum_{t=1}^n  \hat{Q}_t - Q_t $	Somma degli errori assoluti
$\sum_{t=1}^n \left  \frac{\hat{Q}_t - Q_t}{Q_t} \right $	Somma degli errori relativi assoluti
$\sum_{t=1}^n  \log \hat{Q}_t - \log Q_t $	Somma della differenza assoluta dei logaritmi

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Calibrazione automatica

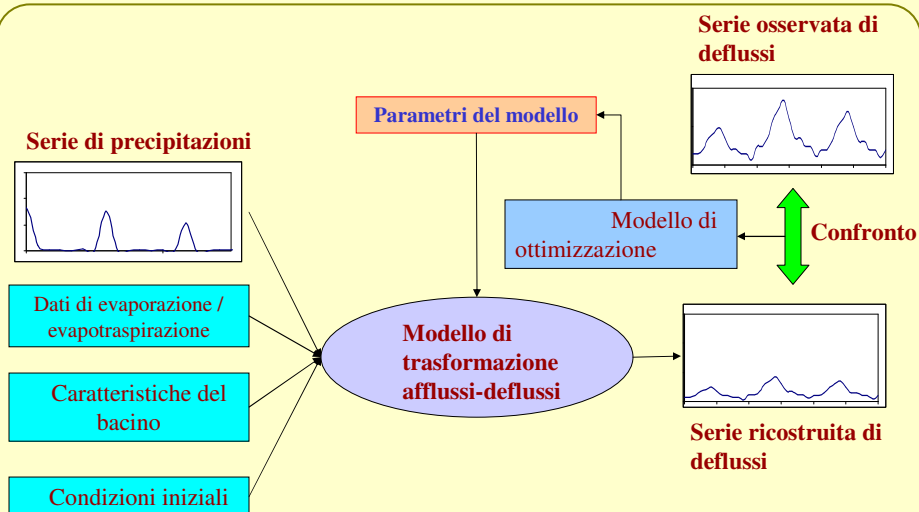
- Nella calibrazione automatica si considerano i deflussi calcolati come funzione implicita dei parametri  $X_1, X_2, \dots, X_n$  e si ricerca, utilizzando opportuni algoritmi di ottimizzazione il minimo della funzione (detta obiettivo):

$$f(X_1, X_2, \dots, X_n) = \sum_{t=1}^n [\hat{Q}_t(X_1, X_2, \dots, X_n) - Q_t]^2$$

- In generale la funzione obiettivo può essere costituita da uno qualsiasi degli indici prima considerati

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Calibrazione automatica



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Validazione dei modelli

- La fase di validazione consente di valutare la cosiddetta capacità di generalizzazione del modello
- Generalmente, si suddivide il campione di dati disponibili in due parti: la prima viene utilizzata per la calibrazione, la seconda per la validazione
- Generalmente nella validazione si confronta la risposta del modello con i deflussi osservati attraverso alcuni indici:
  - ME (mean error)
  - MSE (Mean Square Error)
  - RMSE
  - Coefficiente di correlazione R
  - Indice di Nash-Sutcliffe

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

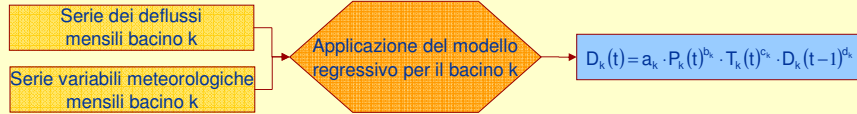
## Modelli a scatola chiusa (black-box)

- I modelli a scatola chiusa non si propongono di simulare i singoli processi idrologici ma sono costituiti da relazioni matematiche, più o meno semplici, che riproducono approssimativamente il legame tra una o più serie in input e output
- Non avendo né i parametri, né le relazioni matematiche alcun significato fisico, la fase di calibrazione è fondamentale ed è fortemente influenzata dalla disponibilità di dati
- Modelli regressivi
  - Lineari
  - Non lineari
- Modelli a reti neurali
  - Reti feedforward

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

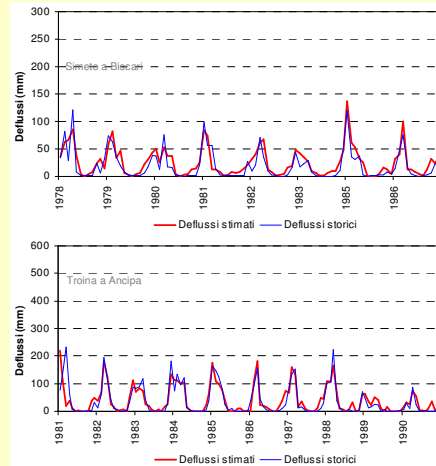
## Modelli di regressione per la valutazione delle risorse idriche naturali

### Sviluppo e calibrazione dei modelli regressivi



### Risultati validazione dei modelli

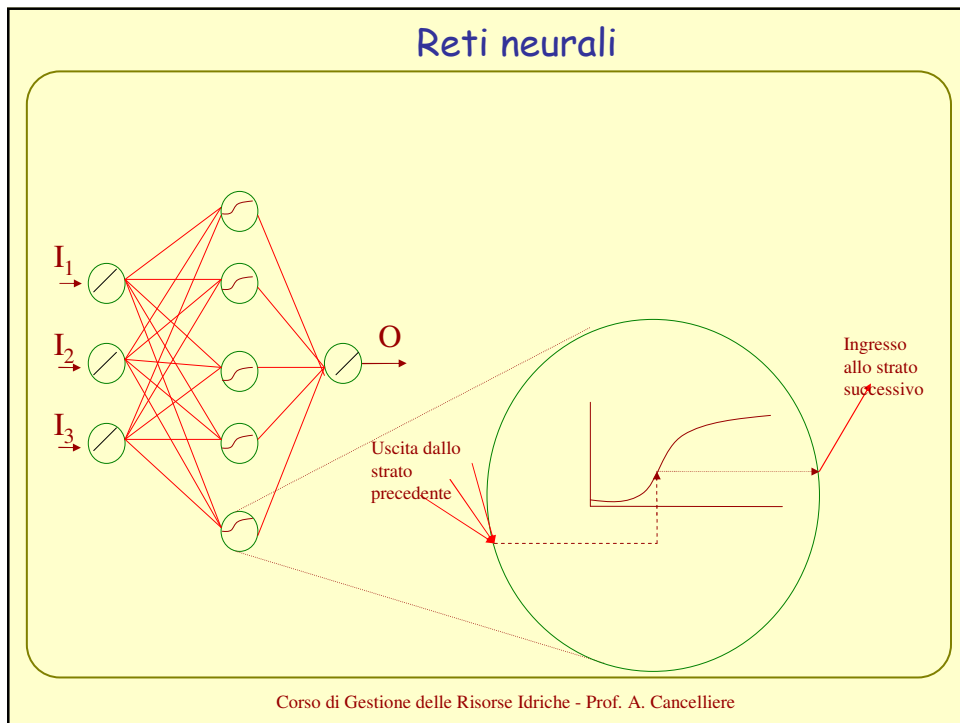
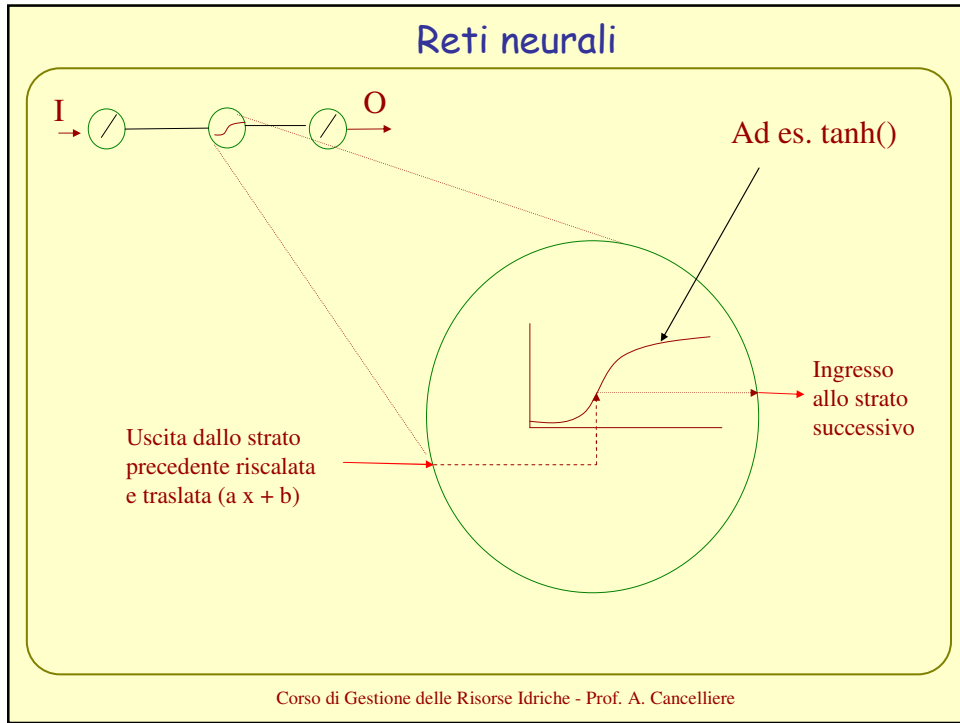
Corso d'acqua e stazione	ME (mm/mese)	RMSE/ $\bar{y}$	R <sup>2</sup>
Crisa a Case Carelle	-0.9	0.89	0.25
Dittaino a Bozzetta	-6.1	1.77	0.44
Girgia a Case Celso	-7.3	2.68	0.28
Sciaguana a Torricchia	1.5	1.72	0.12
Salso a Ponte Gagliano	-0.2	0.87	0.78
Salso a Pozzillo	0.5	0.72	0.87
Saracena a Chiusitta	5.4	0.69	0.64
Simeto a Biscari	-5.7	0.53	0.71
Troina a Ancipa	-2.5	0.80	0.70



## Reti neurali

- La tecnica di regressione richiede la scelta preliminare della espressione matematica che lega la variabile indipendente (deflusso al mese  $t$ ) alle variabili indipendenti (precipitazioni, temperature, evapotraspirazione, etc..)
- Le reti neurali sono strumenti matematici in grado di approssimare una vasta classe di funzioni non lineari e conseguentemente si prestano ad affrontare il problema
- Le reti neurali hanno la capacità di "imparare" attraverso esempi e di adattarsi alla natura del problema





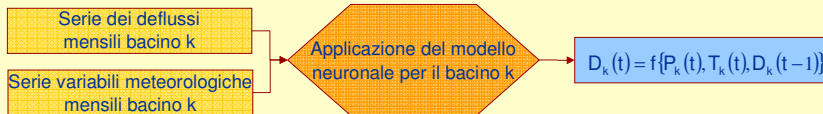
## Reti neurali

- **Vantaggi**
  - Non richiede la scelta preliminare della forma dell'equazione di regressione
  - Consente di riprodurre una vasta classe di funzioni non lineari variando il numero di neuroni dello strato nascosto e le relative funzioni di attivazione
  - Disponibilità di algoritmi efficienti per "l'allenamento" (calibrazione)
- **Svantaggi**
  - Procedura "trial and error" per la definizione dell'architettura
  - Nessuna (o quasi) possibilità di tenere conto esplicitamente della fisica del processo analizzato

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

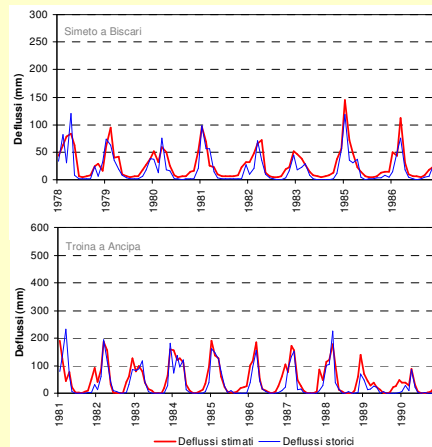
## Modelli a reti neurali per la valutazione delle risorse idriche naturali

### Sviluppo e calibrazione dei modelli a reti neurali



### Risultati validazione dei modelli

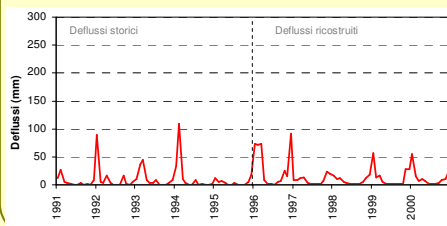
Corso d'acqua e stazione	Architettura	ME (mm/mese)	RMSE/ $\bar{y}$	$R^2$
Crisa a Case Carelle	4-3-1	-2,1	0,82	0,45
Dittaino a Bozzetta	4-3-1	-6,1	1,97	0,30
Girgia a Case Celso	4-2-1	-9,4	2,48	0,10
Salso a Ponte Gagliano	4-4-1	4,4	1,02	0,70
Salso a Pozzillo	4-5-1	-1,4	0,81	0,83
Saracena a Chiusitta	4-2-1	5,1	0,90	0,39
Sciaguana a Torricchia	4-3-1	-0,6	1,80	0,10
Simeto a Biscari	4-4-1	-8,9	0,84	0,60
Troina a Ancipa	4-3-1	-12,8	0,89	0,63



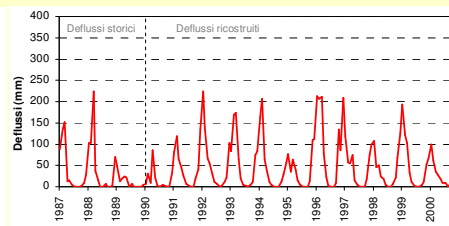
## Estensione delle serie delle risorse idriche naturali



Salso a Pozzillo



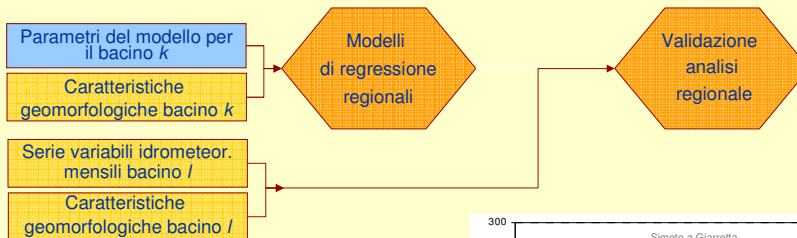
Troina ad Ancipa



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Modelli di regressione a parametri regionali

Sviluppo di modelli di regressione regionali tramite procedura "two-step"



$$D(t) = a \cdot P(t)^\beta \cdot T(t)^\gamma \cdot D(t-1)^\delta;$$

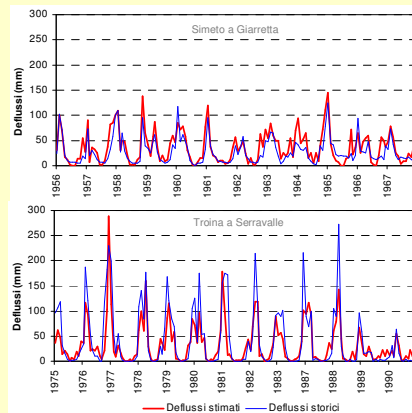
$$a_i = \alpha \cdot \text{perm}_i^\beta \cdot S_i^\gamma \cdot h_{mi}^\lambda;$$

$$b_i = \alpha \cdot \text{perm}_i^\beta \cdot S_i^\gamma;$$

$$c_i = \alpha \cdot h_{mi}^\lambda;$$

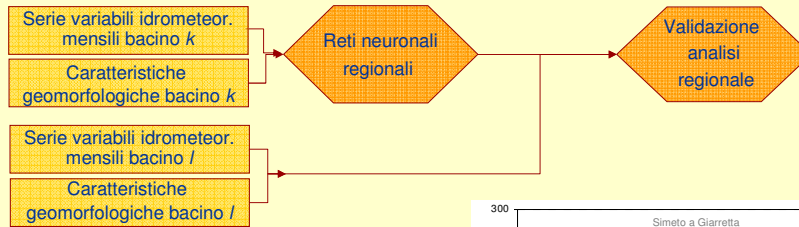
$$d_i = \alpha \cdot i_{mi}^\delta \cdot \text{aff}_i^\delta;$$

Corso d'acqua e stazione	ME (mm/mese)	RMSE/ $\bar{y}$	R <sup>2</sup>
Simeto a Giarretta	-8,9	0,67	0,65
Troina a Serravalle	8,7	0,48	0,69



## Modelli a reti neurali regionali

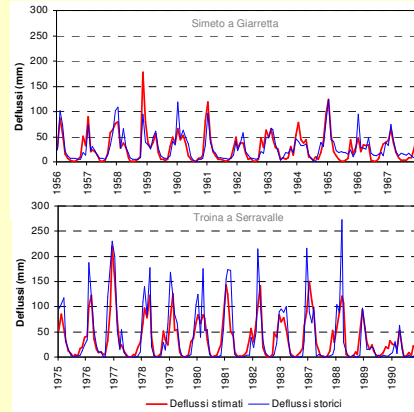
Sviluppo di reti neurali regionali tramite procedura "one-step"



$$D(t) = f\{P(t), T(t), D(t-1), S, \text{perm}\}$$

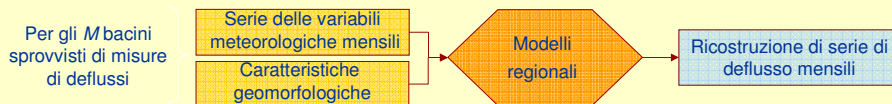
$$D(t) = f\{P(t), T(t), S, \text{perm}\}$$

Corso d'acqua e stazione	ME (mm/mese)	RMSE / $\bar{y}$	R <sup>2</sup>
Simeto a Giarretta	-1,5	0,58	0,74
Troina a Serravalle	4,3	0,48	0,69

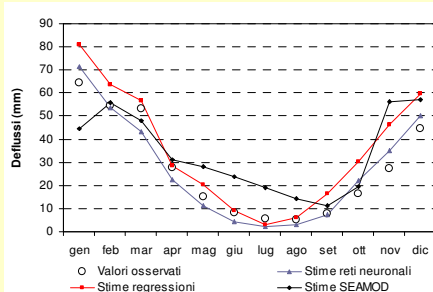


## Ricostruzione delle serie delle risorse idriche naturali

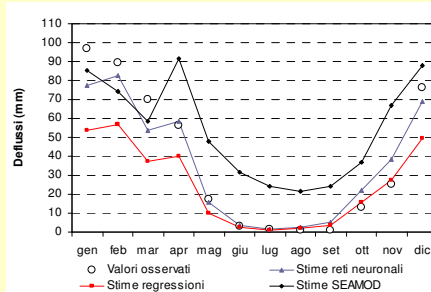
Applicazione dei modelli regionali validati



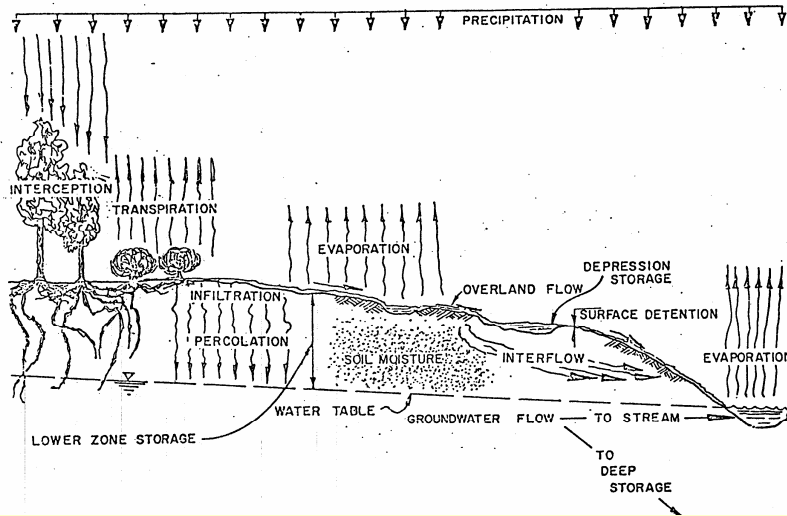
Simeto a Giarretta



Troina a Serravalle

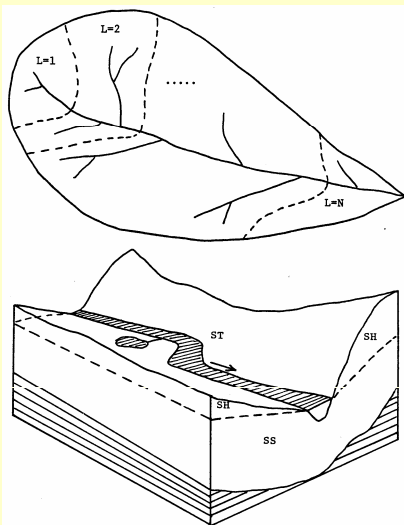


## Processi idrologici nella formazione dei deflussi



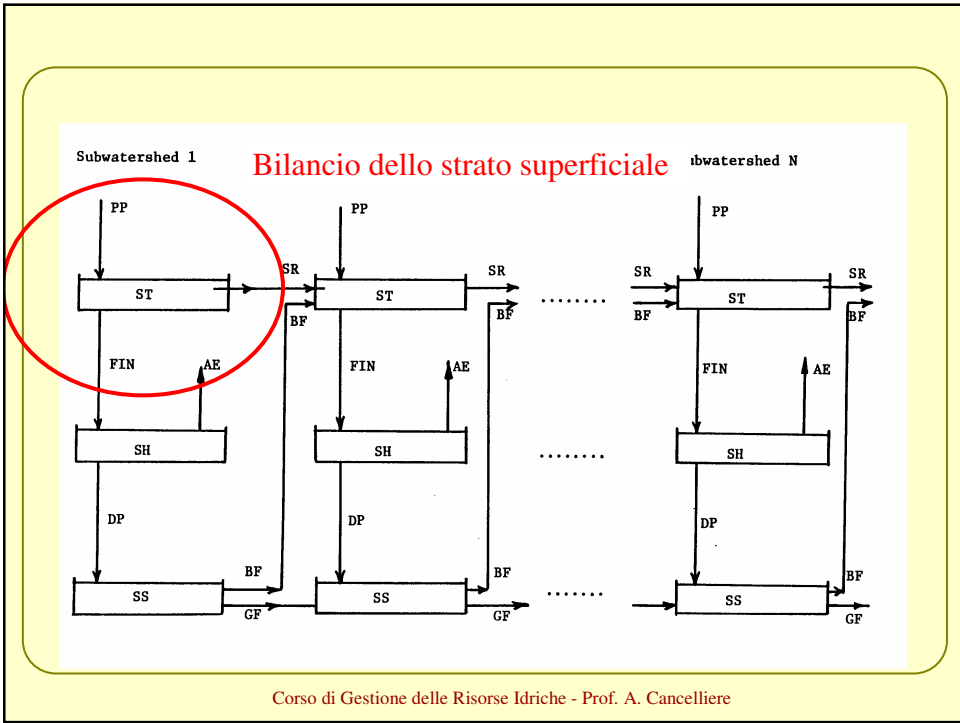
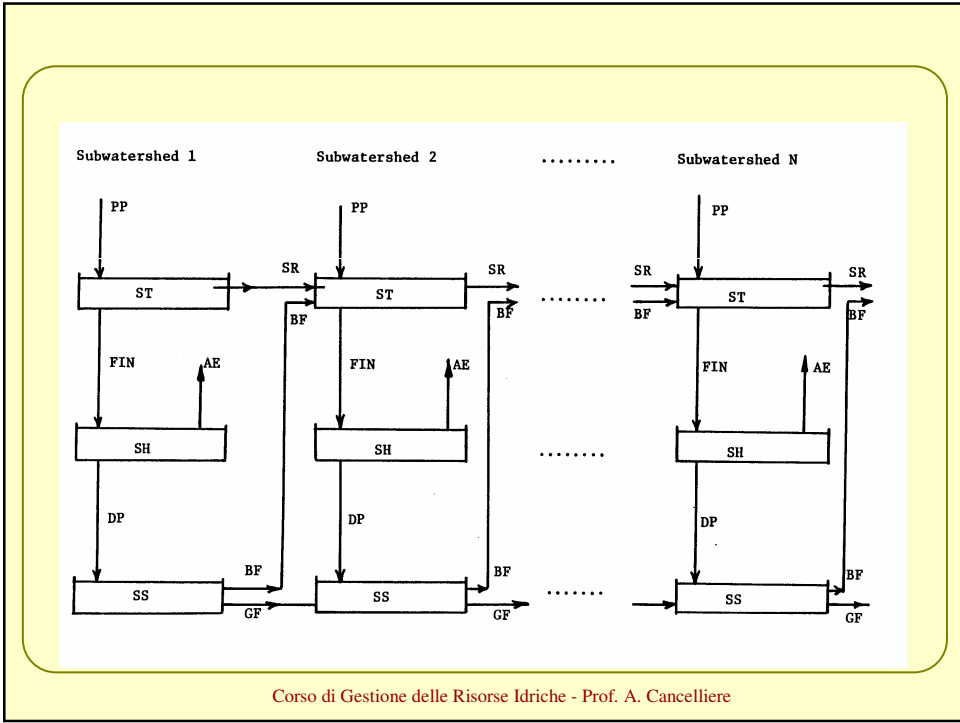
Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Modello afflussi deflussi SEAMOD

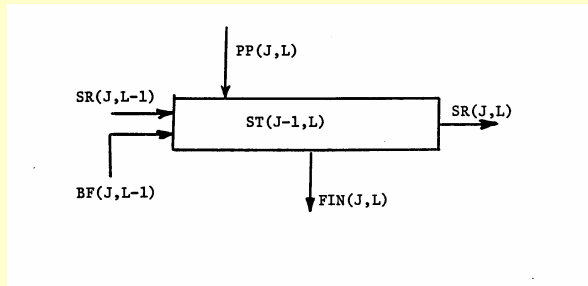


- Modello concettuale a parametri concentrati
- Bacino schematizzato in più sotto-bacini
- Ciascun sotto-bacino costituito da tre strati:
  - Superficiale
  - Sub superficiale (non saturo)
  - Profondo (acquifero)

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere



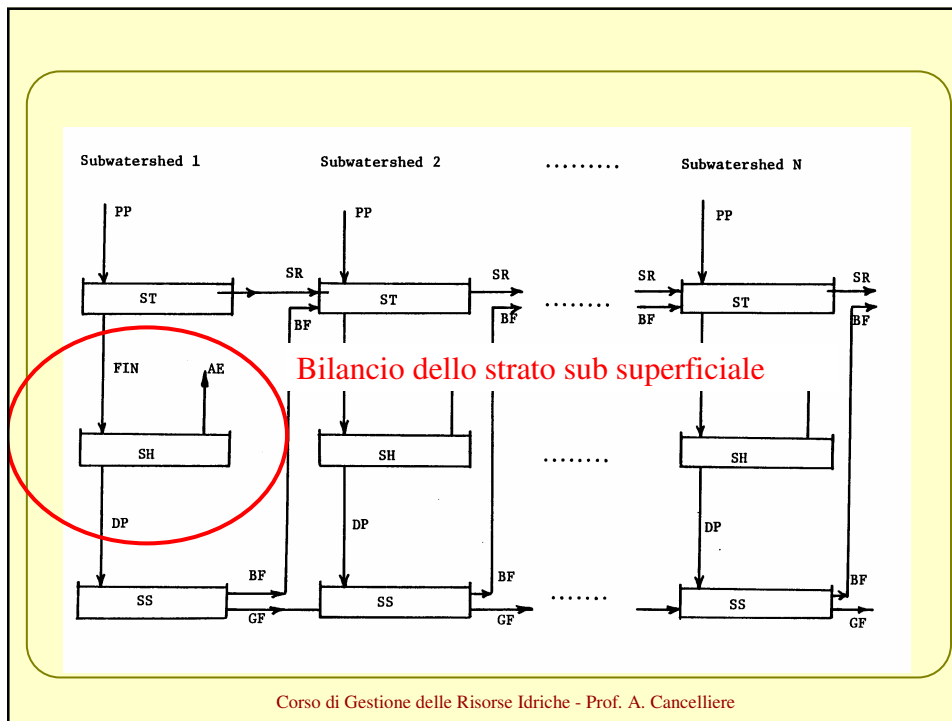
## Bilancio dello strato superficiale



**PP(J,L):** precipitazione al mese J nel sottobacino L  
**ST(J-1,L):** contenuto idrico dello strato superficiale al mese J-1  
**SR(J,L-1):** deflusso superficiale dal sottobacino L-1  
**BF(J,L-1):** deflusso di base dal sottobacino L-1  
**FIN(J,L):** infiltrazione  
**SR(J,L):** deflusso superficiale

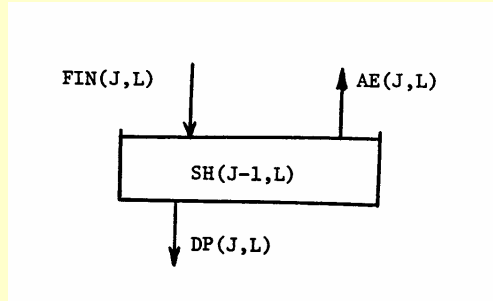
$$\mathbf{ST(J,L)=ST(J-1,L)+PP(J,L)-FIN(J,L)+SR(J,L-1)+BF(J,L-1)-SR(J,L)}$$

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

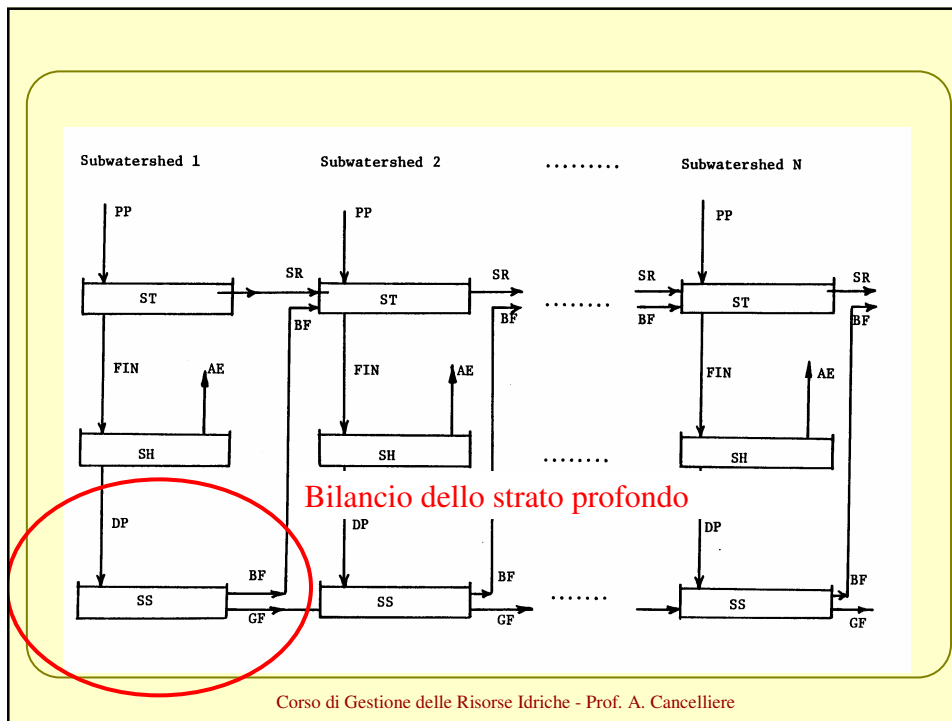
## Bilancio dello strato sub superficiale (non saturo)



FIN(J,L): infiltrazione dallo strato superficiale  
 SH(J-1,L): contenuto idrico dello strato sub superficiale al mese J-1  
 AE(J,L): evapotraspirazione  
 DP(J,L): percolazione verso lo strato profondo

$$SH(J,L) = SH(J-1,L) + FIN(J,L) - AE(J,L) - DP(J,L)$$

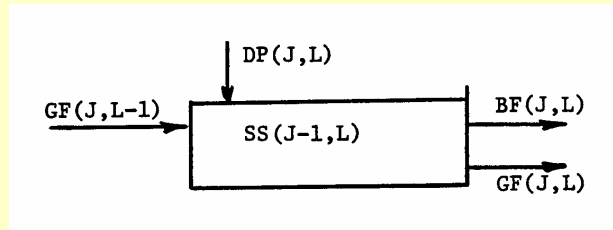
Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere



## Bilancio dello strato profondo (acquifero)



$SS(J-1, L)$ : contenuto idrico dello strato profondo al mese  $J-1$

$DP(J, L)$ : percolazione dallo strato sub superficiale

$GF(J, L-1)$ : deflusso sotterraneo dal sottobacino  $L-1$

$BF(J, L)$ : deflusso base

$GF(J, L)$ : deflusso sotterraneo

$$SS(J, L) = SS(J-1, L) + DP(J, L) + GF(J, L-1) - BF(J, L) - GF(J, L)$$

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Relazioni tra i termini dei bilanci

- Al fine di risolvere in un dato mese i bilanci dei vari strati (ed in ultima analisi determinare il deflusso superficiale dell'ultimo sottobacino) occorre specificare le relazioni tra gli input e gli output di ciascuno strato
- Tali relazioni costituiscono la parte dinamica del modello in quanto consentono di aggiornare attraverso i bilanci mese per mese i contenuti idrici degli strati considerati
- In particolare occorre definire e schematizzare i seguenti processi idrologici:
  - Deflusso superficiale
  - Infiltrazione
  - Evapotraspirazione
  - Percolazione profonda
  - Deflusso base
  - Deflusso sotterraneo

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Deflusso superficiale

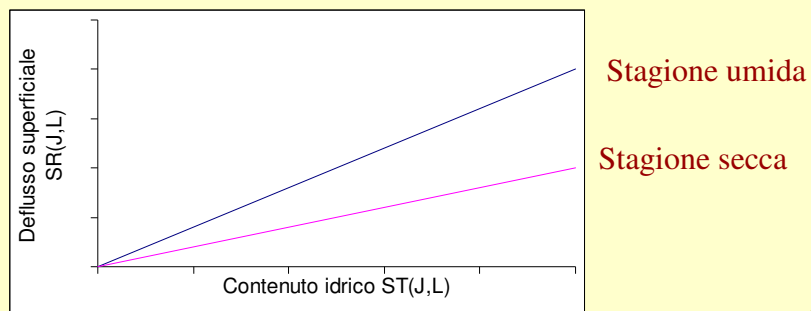
- Il deflusso superficiale uscente nel mese J dallo strato superficiale del bacino L si assume come una funzione lineare del contenuto idrico  $ST(J,L)$ , attraverso due parametri:

- Nella stagione umida:

$$SR(J,L) = X_2 * ST(J,L) \quad 0 \leq X_2 \leq 1$$

- Nella stagione secca

$$SR(J,L) = X_3 * ST(J,L) \quad 0 \leq X_3 \leq 1$$



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Infiltrazione

Il calcolo dell'infiltrazione si basa sul confronto tra la precipitazione  $PP$  e la capacità di infiltrazione  $CI$ :

- $FIN(J,L) = PP(J,L)$  se  $PP(J,L) \leq CI(J,L)$
- $FIN(J,L) = CI(J,L)$  se  $PP(J,L) > CI(J,L)$

La capacità di infiltrazione si può determinare in due modi:

- Capacità di infiltrazione costante per la stagione umida e per la stagione secca:

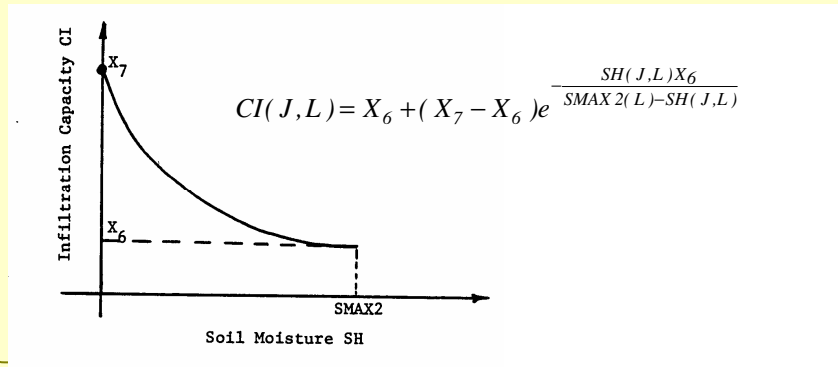
$$CI(J,L) = X_6 \quad \text{stagione umida}$$

$$CI(J,L) = X_7 \quad \text{stagione secca}$$

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Capacità di infiltrazione CI

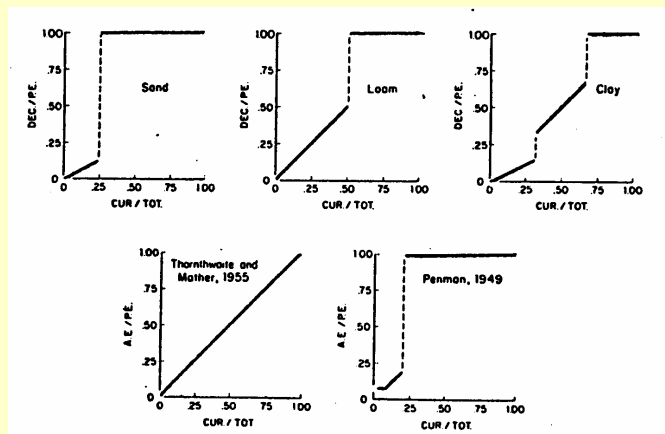
- In alternativa si può assumere una capacità di infiltrazione variabile in funzione del contenuto idrico dello strato non saturo SH



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Evapotraspirazione

L'evapotraspirazione reale è funzione dell'evapotraspirazione potenziale e del contenuto idrico del terreno



Zahner, 1967

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Evapotraspirazione

- L'evapotraspirazione potenziale ET viene calcolata in SEAMOD come una percentuale dell'altezza di evaporazione EV:

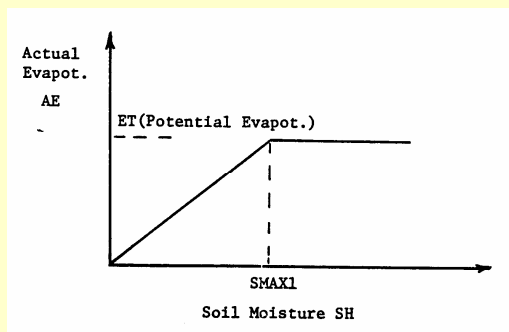
$$ET(J,L)=X_1 EV(J,L) \quad \text{con } 0 \leq X_1 \leq 1$$

- L'evaporazione può essere misurata (evaporimetri) ovvero stimata in diversi modi
- Qualora si abbiano stime dell'evapotraspirazione potenziale, basta sostituire EV con ET e porre il parametro  $X_1=1$

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Evapotraspirazione

- Nota l'evapotraspirazione potenziale, si assume il seguente legame tra evapotraspirazione reale e contenuto idrico del terreno SH



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Percolazione profonda

- Con riferimento allo strato non saturo, la percolazione profonda si verifica quando il contenuto idrico del terreno eccede la capacità di campo (FC)
- Considerando il contenuto idrico medio dello strato non saturo:

$$SHA(J,L) = .5[SH(J-1,L) + SH(J,L)]$$

La percolazione profonda sarà:

$$\begin{aligned} DP(J,L) &= 0 && \text{se } SHA(J,L) \leq FC(L) \\ DP(J,L) &= SHA(J,L) - FC(L) && \text{se } SHA(J,L) > FC(L) \end{aligned}$$

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Deflusso base

- L'acqua immagazzinata nell'acquifero in parte ritorna in superficie (sotto forma di deflusso base BF) ed in parte defluisce nella falda (sotto forma di deflusso sotterraneo GF)
- Il deflusso base si considera una funzione lineare del contenuto idrico nello strato saturo SS:
  - $BF(J,L) = X_5 SS(J,L)$        $0 \leq X_5 \leq 1$
- Analogamente il deflusso sotterraneo GF si calcola come:
  - $GF(J,L) = X_4 SS(J,L)$        $0 \leq X_4 \leq 1$
- Ovviamente:
  - $0 \leq X_5 + X_4 \leq 1$

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Deflusso totale

- Il deflusso superficiale complessivo in corrispondenza della sezione terminale del sottobacino sarà:
  - $QCOM(J,L)=SR(J,L)+BF(J,L)$

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Dati di input e parametri

1. Dati idrologici
  - Precipitazioni mensili ragguagliate sui sottobacini
  - Altezze di evaporazione (o evapotraspirazione potenziale) ragguagliate sui sottobacini
  - Eventuale deflusso osservato alla sezione terminale del bacino
2. Caratteristiche dei sottobacini
  - Superficie
  - Contenuto idrico iniziale negli strati superficiale, sub superficiale e profondo
3. Parametri relativi ai diversi processi idrologici:
  - X1      evapotraspirazione potenziale
  - X2      deflusso superficiale (stagione umida)
  - X3      deflusso superficiale (stagione secca)
  - X4      deflusso sotterraneo
  - X5      deflusso base
  - X6,X7   infiltrazione

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Dati di output

- Deflussi superficiali
- Deflussi sotterranei
- Filtrazione
- Evapotraspirazione reale
- Percolazione profonda

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Calibrazione dei modelli

- La determinazione ottimale dei parametri e delle caratteristiche dei sottobacini costituisce la cosiddetta fase di calibrazione del modello
- Per effettuare la calibrazione è necessario un criterio per misurare l'adeguatezza del modello a simulare situazioni "reali"
- Generalmente si simula la risposta idrologica del bacino durante un periodo in cui sono disponibili osservazioni contemporanee di precipitazioni (input) e deflussi (output) e si confrontano i deflussi simulati con quelli osservati

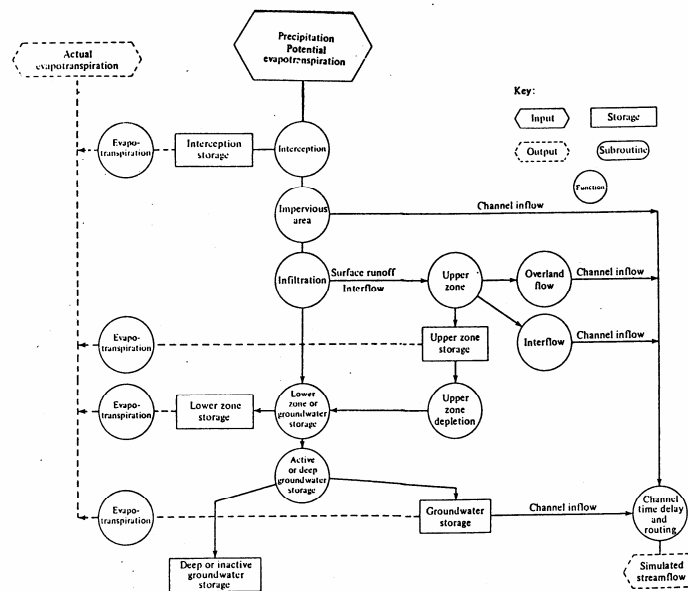
Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Stanford Watershed Model (SWM)

- Modello concettuale continuo a parametri concentrati
- Scala temporale oraria (riesce a simulare anche i singoli eventi)
- Due moduli principali

Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere

## Stanford Watershed Model (SWM)



Corso di Gestione delle Risorse Idriche - Prof. A. Cancelliere



Esempi di applicazione:

Blue River near White Cloud, Indiana, US

Salso al Serbatoio Pozzillo