

# Università della Calabria

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

CORSO DI IDROLOGIA N.O.

Prof. Pasquale Versace



## SCHEDA DIDATTICA N° 7

IL CICLO IDROLOGICO ED IL BILANCIO IDROLOGICO A SCALA DI BACINO



A.A. 2010-11

## IL CICLO DELL'ACQUA

Il compito dell'Idrologia è semplice e affascinante: studiare il ciclo dell'acqua sulla terra per contribuire alla definizione delle politiche di intervento necessarie

- a soddisfare i fabbisogni di acqua per la vita, per la salute, per lo sviluppo;
- a prevenire la distruzione degli ecosistemi;
- a ridurre gli effetti dei disastri naturali.

Problemi di straordinaria rilevanza che si aggravano nel tempo con la diminuzione quantitativa e qualitativa della risorsa acqua, l'aumento esponenziale del territorio antropizzato da sviluppare, risanare, difendere dai fenomeni naturali. La forbice tra bisogni e disponibilità si amplia sempre di più.

L'idrologo deve fornire gli strumenti predittivi necessari per decidere la gestione delle risorse idriche, la tutela della loro qualità, gli interventi di mitigazione del rischio. Deve perciò capire e conoscere i fenomeni nel maggior dettaglio possibile. Deve saperli descrivere con la maggiore precisione possibile. Deve essere in grado di riprodurre e simulare i fenomeni che si sviluppano a scala di versante e a scala di bacino sia quelli naturali sia quelli condizionati o comunque influenzati dall'azione dell'uomo.

Da quanto premesso è evidente quanto la nozione di ciclo idrologico sia di fondamentale importanza in Idrologia. Il **ciclo idrologico** (o ciclo dell'acqua) rappresenta l'insieme di tutti i fenomeni legati all'acqua nel suo naturale movimento sulla superficie terrestre. Nel termine ciclo è insita l'idea di un meccanismo di ricircolo come è ben evidenziato nella frase di Leonardo da Vinci:

*".....da cui si può concludere come l'acqua vada dai fiumi al mare e dal mare ai fiumi, quindi costantemente circolando e tornando e come tutti i mari e i fiumi siano passati infinite volte dalla foce del Nilo ....."*

Il ciclo idrologico mette in comunicazione l'atmosfera, le terre emerse e gli oceani. Ad ogni ciclo la molecola d'acqua viene sottoposta ad almeno due cambiamenti di stato: da vapore a liquido o solido e nuovamente a vapore. Durante il corso l'enfasi verrà posta sui processi che si verificano sul suolo o al suo interno, trascurando i processi di trasporto nell'atmosfera o negli oceani.

L'acqua **evapora**, sotto l'azione della radiazione solare, a partire dal terreno, dalla vegetazione e dagli specchi d'acqua, per poi essere trasportata, sotto forma di nubi di vapor d'acqua, dal movimento dell'atmosfera.

Le nubi, in particolari condizioni di temperatura e pressione, tendono quindi a ricondensarsi **precipitando** nuovamente al suolo o sugli specchi d'acqua sotto forma di piccole goccioline d'acqua o cristalli di neve

Se la precipitazione è solida tenderà ad accumularsi sulla superficie fintanto che le condizioni di temperatura e radiazione non ne consentano la **fusione** o la sublimazione. Se invece la precipitazione è liquida si innesca un fenomeno piuttosto complesso che permette ai suoli di trattenere temporaneamente tutta o parte della precipitazione e che dipende dalla natura dei suoli, dalla vegetazione presente, dalle condizioni di umidità iniziale e dalle condizioni meteorologiche.

L'acqua **infiltrata** al suolo verrà in parte richiamata dalle radici delle piante e rilasciata in atmosfera sotto forma di **traspirazione**, in parte **drenata** verso valle dagli strati più superficiali del terreno, ove vi sia un adeguato gradiente topografico, ed in parte andrà a ricaricare le falde sottostanti.

La componente della precipitazione non infiltrata, dopo aver riempito le buche e gli avvallamenti superficiali tenderà a **scorrere lungo le superfici** e i piani inclinati fino a raggiungere un reticolo di rivoli e canaletti inizialmente effimeri ed intermittenti che si raccolgono via via in canali di dimensione sempre maggiore. L'insieme di tutti questi canali viene chiamato rete drenante.

Ai volumi transitanti nella rete drenante vengono poi a sommarsi, in tempi più o meno lunghi ed in funzione della permeabilità dei suoli incontrati, i volumi di drenaggio provenienti dai suoli non saturi in forma di **deflusso ipodermico** e dalle zone giunte a saturazione sotto forma di **deflusso di falda**.

La rete drenante convoglia quindi le acque in canali, torrenti, fiumi sempre più grandi fino a finire nuovamente a valle verso i mari e gli oceani a chiusura del ciclo.

La figura rappresenta in maniera schematica il ciclo idrologico del pianeta, in cui i valori relativi alle diverse forme di trasporto sono proporzionali al valore di precipitazione sulle terre emerse che è stato posto pari a 100.



**Figura 1-** Flussi all'interno del ciclo idrologico. Le unità sono in termini relativi alla precipitazione annuale sulla superficie terrestre (100 = 119.000 km<sup>3</sup>anno<sup>-1</sup>)

Il ciclo idrologico può essere descritto analizzando i flussi in ingresso, quelli in uscita, le trasformazioni e i vari livelli di immagazzinamento.

Quantitativamente si applica, quindi, il principio di conservazione della massa, tramite il quale è possibile impostare un **bilancio idrologico**. Il bilancio può essere formulato con riferimento ad un qualsiasi "volume di controllo" ovvero un elemento tridimensionale attraverso il quale avvengono i flussi in ingresso ed uscita.

L'equazione generale del principio di conservazione della massa per il bilancio idrologico, applicabile ad ogni volume di controllo è la seguente:

**"la variazione nel tempo della massa d'acqua (M) è pari alla differenza fra il flusso entrante (input) e quello uscente (output)"**

**I = flusso entrante o input del sistema**

**O = flusso uscente o output del sistema**

**t = tempo**

$$\frac{dM}{dt} = I - O$$

In relazione agli obiettivi dell'indagine, il volume di controllo può essere costituito da una parcella di terreno o da un versante, ma l'unità territoriale più conveniente per l'indagine idrologica è quella del bacino idrografico. Il ciclo idrologico a scala globale costituisce un sistema chiuso in termini di bilancio idrologico.

Altrettanto importante è l'identificazione del periodo di riferimento nel quale effettuare il bilancio idrologico. Si può utilizzare una scala temporale mensile, stagionale, annuale, pluriennale. La scala stagionale può coincidere con le stagioni convenzionali (estate, ecc.) o riferirsi a stagioni idrologiche: stagione secca e stagione umida. La prima inizia, a seconda delle zone, tra la fine di aprile e la fine di giugno e termina tra l'inizio di settembre e la fine di ottobre. La seconda ovviamente copre la restante parte dell'anno.

**In ogni caso è essenziale, quando si effettua un bilancio idrologico, fissare il volume di controllo ed il periodo di riferimento.**

## BILANCIO IDROLOGICO A SCALA DI BACINO

L'insieme dei processi idrologici che, nel loro insieme, costituiscono la trasformazione afflussi-deflussi operata dal bacino idrografico è rappresentabile, in una forma generale ma sufficientemente completa, nello schema a blocchi della figura 2.

Nella figura i blocchi rappresentano forme di immagazzinamento dell'acqua e le linee che li collegano rappresentano i singoli processi che trasferiscono l'acqua da una forma di accumulo all'altra. Complessivamente il contorno tratteggiato blu delimita la parte del ciclo idrologico che rappresenta la trasformazione afflussi-deflussi operata dal bacino idrografico che in questo caso è il volume di controllo.

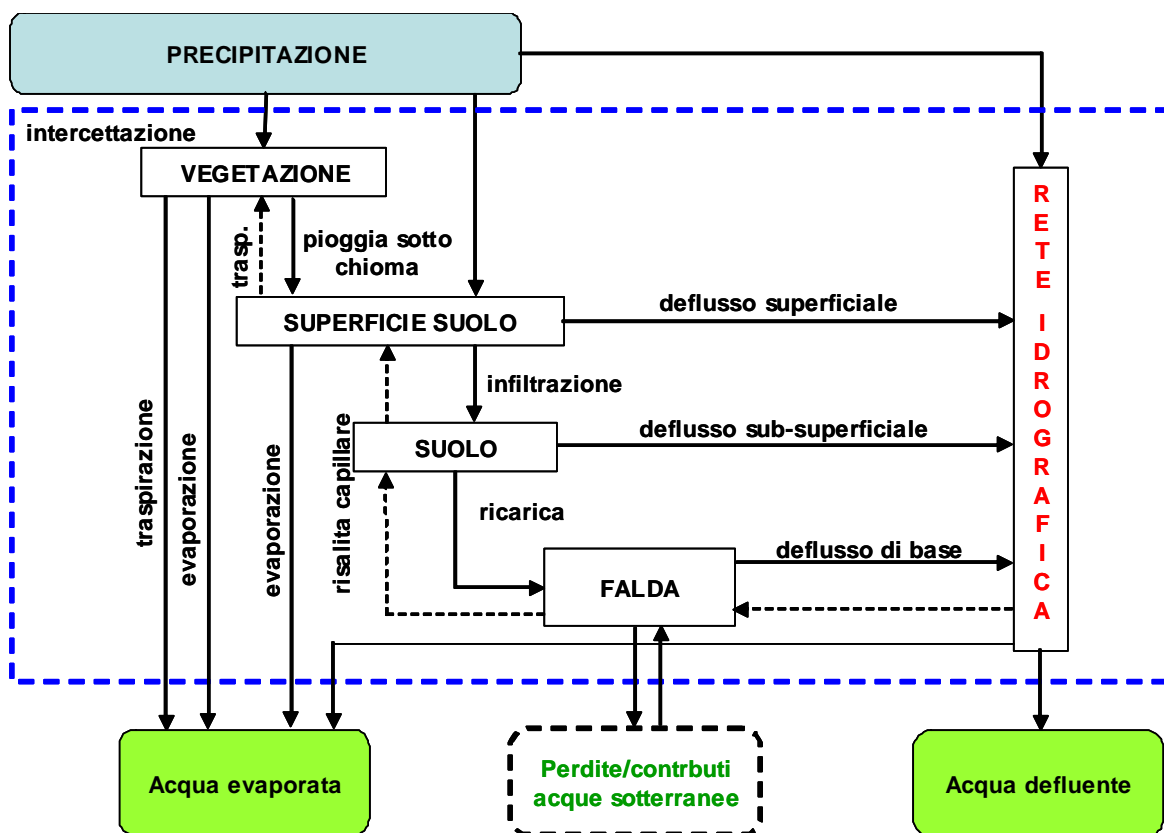


Figura 2- Schema a blocchi per il bilancio idrico di bacino.

La precipitazione  $P$  va in gran parte ai blocchi che rappresentano la superficie del bacino (inclusa la copertura vegetale) ed in piccola parte direttamente a quello che rappresenta la rete drenante del bacino. I tre blocchi che rappresentano la superficie del bacino, la rete idrografica e la copertura vegetale alimentano l'evaporazione attraverso la quale si ha ritorno dell'acqua nell'atmosfera. L'evaporazione comprende, quindi, l'evaporazione dall'apparato fogliare, l'evaporazione dal velo d'acqua che copre il terreno durante la pioggia e dalle depressioni superficiali, l'evaporazione dagli specchi d'acqua e quella dal terreno umido.



Il blocco che rappresenta la superficie del terreno alimenta anche l'infiltrazione nel suolo  $F$  e la componente  $Q_s$  di deflusso superficiale.

Il blocco che rappresenta il suolo alimenta anche lo scorrimento sottosuperficiale (o sub-superficiale o ipodermico)  $Q_i$  e la ricarica degli acquiferi (o percolazione profonda)  $R$ .

Il blocco che rappresenta gli acquiferi (falda) alimenta lo scorrimento profondo che si suddivide in due parti: lo scorrimento che corrisponde al deflusso di base  $Q_b$  nella rete drenante e lo scorrimento verso gli strati più profondi o verso l'esterno  $Q_u$ , che rappresenta comunque una perdita nell'ambito del bilancio di bacino. Al di sopra della falda a causa della porosità si può osservare il fenomeno di risalita capillare attraverso i pori i quali si comportano come tubi di piccolo diametro. I vuoti dello strato non saturo costituiscono un sistema continuo di canali tortuosi e a sezione variabile lungo i quali l'acqua risale dal livello di falda fino ad altezze diverse.

Dal blocco che rappresenta la rete drenante esce infine il deflusso totale  $Q$  alla sezione di chiusura del bacino dato dalla somma:

$$Q = Q_s + Q_i + Q_b$$

Si può inoltre scrivere la relazione che rappresenta il principio di conservazione della massa applicato a tutto il volume di controllo.

L'equazione di continuità globale in questo contesto prende il nome di equazione del ***bilancio idrologico del bacino***. Applicando l'equazione globale al volume di controllo che ha la base coincidente con lo strato impermeabile su cui poggiano gli acquiferi, il limite superiore al di sopra della vegetazione ed un contorno cilindrico che passa per lo spartiacque del bacino, per l'unità di tempo considerato possiamo scrivere la seguente relazione:

$$P + Q_e = E_a' + E_a'' + E_v + T + Q + Q_u + \Delta V_v + \Delta V_s + \Delta V_u + \Delta V_a + \Delta V_r$$

dove:

- $P$  è la precipitazione complessiva sul bacino;
- $Q_e$  è la quantità d'acqua entrata nel bacino per scorrimento sotterraneo;
- $E_a'$  è la quantità d'acqua evaporata dalla rete idrografica o da altri specchi d'acqua come i laghi;
- $E_a''$  è la quantità evaporata dal velo d'acqua che copre la superficie del suolo durante e poco dopo la precipitazione e dallo strato areato del terreno;
- $E_v$  è la quantità d'acqua evaporata dalla copertura vegetale durante e poco dopo la precipitazione;
- $T$  è la quantità di acqua traspirata dalla vegetazione;
- $Q$  è il deflusso totale alla sezione di chiusura del bacino;
- $Q_u$  è la quantità d'acqua uscita dal bacino per scorrimento sotterraneo;

- $\Delta V_v$  è l'incremento del volume d'acqua immagazzinato dalla vegetazione ipotizzato in gran parte dovuto al fenomeno di intercezione vegetale  $I$ ;
- $\Delta V_s$  è l'incremento del volume d'acqua immagazzinato nelle depressioni superficiali;
- $\Delta V_u$  è l'incremento del volume d'acqua immagazzinato come umidità nello strato del suolo areato;
- $\Delta V_a$  è l'incremento del volume d'acqua immagazzinato negli acquiferi;
- $\Delta V_r$  è l'incremento del volume d'acqua immagazzinato nella rete idrografica del bacino.

In particolare,

- i termini  $P+Q_e$  rappresentano il flusso entrante o input
- i termini  $E_a'+E_a''+E_v+T+Q+Q_u$  rappresentano il flusso uscente o output
- i termini  $\Delta V_v+\Delta V_s+\Delta V_u+\Delta V_a+\Delta V_r$  rappresentano la variazione del contenuto di acqua all'interno del volume di controllo nel tempo considerato

Più sinteticamente si può porre l'evapotraspirazione  $ET$  pari alla somma dell' evaporazione e della traspirazione:

$$ET = E_a' + E_a'' + E_v + T$$

Ugualmente, nell'equazione di bilancio globale si può condensare nella variazione complessiva di volume la somma dei termini corrispondenti nei cinque blocchi:

$$\Delta V = \Delta V_v + \Delta V_s + \Delta V_u + \Delta V_a + \Delta V_r$$

Pertanto l'equazione di continuità globale (bilancio idrologico di bacino) si può scrivere nella forma:

$$P + Q_e = ET + Q + Q_u + \Delta V$$

Spesso si può assumere che le due quantità  $Q_e$  e  $Q_u$  siano trascurabili o siano circa uguali tra loro. La forma più sintetica dell'equazione di continuità globale risulta:

$$P = ET + Q + \Delta V$$

Scritta in questa forma l'equazione del bilancio idrologico ci dice che la precipitazione è pari alla somma delle perdite per evapotraspirazione  $ET$ , del deflusso  $Q$  alla sezione di chiusura e dell'incremento  $\Delta V$  del volume d'acqua immagazzinato in varie forme all'interno del volume di controllo assunto a rappresentare il bacino nel tempo di riferimento considerato.

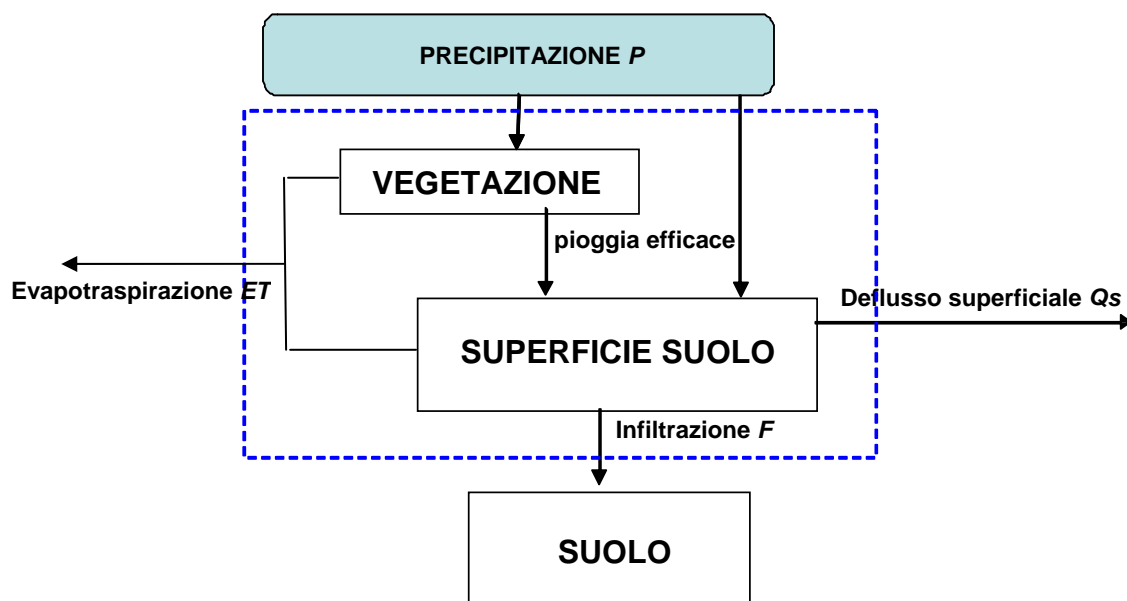


Vale la pena porre l'attenzione sul caso di estremo interesse in cui il volume di controllo considera solo lo strato più superficiale del terreno (Figura 3). A meno della risalita capillare ritenuta trascurabile, l'unico flusso idrico entrante nel volume di controllo è costituito dalla precipitazione  $P$ . I flussi uscenti sono rappresentati: dalla componente superficiale del deflusso,  $Q_s$ ; dall'infiltrazione,  $F$ , verso gli strati più profondi del suolo; dal contributo all'evapotraspirazione,  $ET$ . Il termine  $\Delta V$  coincide, in questo caso, con la somma di  $\Delta V_s$  cioè del volume di acqua immagazzinato nelle depressioni superficiali del terreno e di  $I$ , aliquota trattenuta per effetto dell'intercezione dalla copertura vegetale. L'equazione di bilancio, pertanto diventa:

$$P = ET + Q_s + F + I + \Delta V_s$$

Nelle applicazioni pratiche la grandezza che più spesso è oggetto di investigazione è rappresentata dal termine  $Q_s$ . Per questo motivo, tutti quei fenomeni per i quali il deflusso superficiale alla sezione di chiusura risulta minore dell'afflusso meteorico al bacino sono spesso indicati come "**perdite**". Tra le perdite, la componente che assume un ruolo predominante in caso di eventi di piena è senza dubbio l'infiltrazione.

Facendo riferimento alla perdite del bacino è possibile introdurre le definizioni di pioggia efficace e pioggia netta. La **pioggia efficace** è la frazione di pioggia che riesce effettivamente a raggiungere il suolo dopo la perdita per intercezione dovuta alla copertura vegetale. La quantità di pioggia efficace, depurata delle altre perdite, che effettivamente alimenta il deflusso superficiale è chiamata **pioggia netta**.



**Figura 3** - Schema a blocchi per il bilancio idrico di bacino in cui il volume di controllo considera solo lo strato più superficiale del terreno.

## Esempi di calcoli sugli elementi del bilancio idrologico

### Esempio 1

In un anno in un bacino di 2500 km<sup>2</sup> cadono 130 cm di pioggia. La portata media misurata alla sezione di chiusura è stata di 30 m<sup>3</sup>/s. Stimare:

- 1) la perdita per evapotraspirazione
- 2) il coefficiente di deflusso

L'equazione di bilancio da considerare è:

$$P = ET + Q + \Delta V$$

in cui si assumeranno trascurabili le variazioni di volume immagazzinato ( $\Delta V = 0$ ).

Esprimiamo i diversi termini del bilancio in altezze d'acqua in mm.

1) Calcoliamo il volume totale di deflusso ( $D$ ) moltiplicando la portata media espressa in m<sup>3</sup>/s per il numero di secondi in un anno ( $365 \times 24 \times 3600$ ). Dividiamo il volume ottenuto per la superficie del bacino ( $A$ ) in modo da ottenere lo spessore della lama d'acqua:

$$Q = \frac{D [m^3]}{A [m^2]} = \frac{30 m^3 / s \times (365 \times 24 \times 3600 s / anno)}{2500 km^2 \times 10^6 m^2 / km^2} = 0.378 m = 378 mm$$

Conoscendo poi il valore dell'afflusso annuo, 130 cm ovvero 1300 mm, possiamo risalire ad una stima delle perdite per evapotraspirazione ( $ET$ ) per l'intero bacino:

$$ET = P - Q = 1300 - 378 = 922 \text{ mm}$$

2) il coefficiente di deflusso è il rapporto fra deflussi ed afflussi osservati in un periodo di tempo prefissato. Nel nostro esempio è quindi pari al rapporto tra  $Q$  e  $P$

$$\text{Coefficiente di deflusso} = Q/P = 378/1300 = 0.29$$

### Esempio 2

Si consideri un bacino idrografico di estensione pari a 100 km<sup>2</sup>. la precipitazione media areale annua relativa al bacino è pari a 100 cm. Le perdite per evapotraspirazione sono pari a 600 mm. Si calcoli la portata media annua espressa in m<sup>3</sup>/s. Si assuma che la variazione di invaso complessivo del bacino sia nulla.

Il deflusso annuo espresso in mm è pari a:

$$Q = P - ET = 1000 - 600 = 400 \text{ mm}$$

Dato il valore di deflusso alla sezione di chiusura è possibile calcolare la corrispondente portata media annua defluente, in m<sup>3</sup>/s. Per il bacino in esame il deflusso annuo corrisponde ad una lama d'acqua di 400 mm (0.4 m) uniformemente distribuita sull'intera superficie del bacino (100 000 000 m<sup>2</sup>). Per ottenere il valore di portata in m<sup>3</sup>/s, basterà dividere il volume totale di deflusso per il numero di secondi in un anno:

$$Q = \frac{D[m^3]}{\Delta T[s]} = \frac{0.4m \times 100000000m^2}{(365 \times 24 \times 3600)s} = 1.3m^3 / s$$