

Studio per la definizione del Bilancio Idrico del Bacino Transfrontaliero del Fiume Roja

Piero Barazzuoli¹, Fausto Capacci², Jenny Migliorini³, Roberto Rigati⁴

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena

Centro Interdipartimentale di Ricerca sull'Acqua (C.R.A.)

¹barazzuoli@unisi.it; ²capacci10@unisi.it; ³migliorini5@unisi.it; ⁴rigati@unisi.it

Autore corrispondente: Capacci Fausto Via Laterina, 8 cap. 53100 Siena. Fax: 0577-233938.

The water budget of the Roja drainage basin

ABSTRACT: The investigated drainage basin of the River Roja lies in the Liguria Region of Italy and in the French Maritime Alps ; the study was completed within the context of the European Community Project Interreg IIIA Alcotra "Eurobassin - Piano di bacino transfrontaliero del Fiume Roja". The study aimed to estimate the total water resource in the basin and its surface and ground water distribution and referring to the average hydrological year 1969-1998. Water budget results indicate that the potential water resource at the mouth is equal to $372 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$; the sum of the total internal resource and the external input of groundwater yields the total renewable natural resource, which is equal to $504 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$. Findings suggest that the strategic importance of the basin is such that an integrated Italian-French monitoring system must be planned and implemented.

Key terms: Hydrogeology, Water balance, Runoff on a physiographic basis, Basin planning

Termini chiave: Idrogeologia, Bilancio idrico, Deflusso su basi fisiografiche, Piano di Bacino

Riassunto

L'area indagata è il bacino idrografico del Fiume Roja (670 km^2) situato nella Regione Liguria (Italy) e nel distretto francese delle Alpi Marittime; l'indagine è stata eseguita in adempimento del D.Lgs. 152/2006 ed è inserita nel Progetto della Comunità Europea Interreg IIIA Alcotra "Eurobassin - Piano di bacino transfrontaliero del Fiume Roja".

Scopo dello studio è la valutazione delle risorse idriche complessive del bacino e della loro ripartizione in superficiali e sotterranee con riferimento all'anno idrologico medio 1969-1998.

I risultati del bilancio idrico mostrano che la risorsa idrica potenzialmente utilizzabile alla foce è pari a 372×10^6 di m^3/anno ; la somma della risorsa totale interna con l'apporto sotterraneo esterno fornisce la risorsa rinnovabile totale naturale, che è risultata pari a $504 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$.

Lo studio ha anche evidenziato che l'importanza strategica del bacino giustifica la progettazione e la programmazione di un sistema integrato italo-francese di rilevamento finalizzato ad incrementare le conoscenze su usi e spostamenti dei quantitativi d'acqua, per commisurare i consumi alle effettive disponibilità della risorsa rinnovabile, ed a realizzare un'adeguata distribuzione delle stazioni pluvio-termometriche, oggi disomogenea ed insufficiente per valutazioni di maggior dettaglio.

1. Introduzione

Questo studio trova collocazione nell'ambito del Progetto della comunità europea Interreg IIIA Alcotra "Eurobassin - Piano di bacino transfrontaliero del fiume Roja". L'area oggetto di indagine è il territorio relativo al bacino idrografico Transfrontaliero del Fiume Roja, che si estende per circa 670 km^2 nella Regione Liguria e nel distretto delle Alpi Marittime dello stato francese. In particolare circa 70 km^2 ricadono in Italia nella Provincia di Imperia; i rimanenti 600 km^2 sono tutti in territorio francese (Figura 1).

Ai fini di raggiungere una migliore valutazione delle risorse idriche del bacino idrografico in oggetto, tramite l'utilizzo di calcoli di bilancio, primo passo per giungere ad una loro corretta gestione, è necessaria la stima del suo deflusso naturale al netto dei contributi di acqua sotterranea provenienti da bacini limitrofi. Per tale valutazione risultano pertanto di grande utilità le indagini connesse alla definizione ed alla messa a punto di metodologie in grado di calcolare il suddetto deflusso (Barazzuoli et alii, 1989; Barazzuoli e Salleolini, 1992).

In questa ottica è stata effettuata la valutazione delle risorse idriche complessive del territorio in esame e la loro ripartizione in superficiali e sotterranee applicando i criteri proposti da Barazzuoli e Salleolini, 1992 e Barazzuoli et alii, 1994, 1995: questi poggiano su calcoli di bilancio. Le grandezze indagate possono essere sinteticamente espresse con l'equazione: $P = Er + D + Ie$; dove: P = afflussi; Er = evapotraspirazione reale; D = deflussi alla

stazione idrometrografica che sottende il bacino; Ie = infiltrazione efficace.



Figura 1 – Ubicazione geografica dell'area di studio
Figure 1 – Map of the area under study

2. Parametri idroclimatici

Lo studio ha comportato la raccolta delle serie storiche dei valori annui di precipitazione e temperatura relative a stazioni di misura sparse sull'intero territorio considerato; i valori termo-pluviometrici utilizzati sono quelli delle stazioni termo-pluviometriche più adatte ai fini del presente studio, cioè quelle con minori lacune nel funzionamento degli strumenti di misura (soprattutto per quanto riguarda i dati di precipitazione che incidono maggiormente sui risultati delle varie elaborazioni).

Al fine di conferire ai valori delle risorse superficiali e sotterranee un maggior grado di estrapolabilità a breve-medio termine, in tutte le stazioni utilizzate è stato preso in considerazione lo stesso arco temporale di riferimento, vale a dire l'A.I. 1969-1998, consentendo così un preciso collegamento con quanto ricavato nella valutazione delle risorse idriche rinnovabili mediante i calcoli di bilancio idrico suddetti.

In un territorio di estensione relativamente limitata come il bacino del Fiume Roja, se si eccettuano condizioni locali di esposizione, sono sostanzialmente due i fattori che determinano una diversificazione del clima: la distanza dal mare, da cui il bacino è limitato a Sud, e l'andamento del rilievo (le Alpi Marittime) o, più semplicemente, l'altitudine.

Com'è ben noto, il mare, per la sua inerzia termica, mitiga il clima dei luoghi circostanti, mentre l'altitudine favorisce condizioni termiche più rigide e, almeno fino alle quote presenti nel bacino, tende ad incrementare le precipitazioni. Si tratta, quindi, di effetti sul clima per

molti aspetti contrastanti, effetti che, data la modesta estensione del territorio, possono interferire ed anche compensarsi tra loro.

2.1. Data-base climatico

In questo studio idrologico il primo passo è stato quello della raccolta dei dati; in particolare, per le analisi del bacino idrografico del fiume Roja sono stati informatizzati e organizzati all'interno di data-base i dati pluviometrici, termometrici e quelli relativi ai deflussi di alcune stazioni idrometrografiche. In totale sono state individuate e inserite nel nostro data-base 131 stazioni pluviometriche (Figura 2), delle quali 66 sono anche termometriche e 11 solo termometriche; queste sono gestite da istituti idrografici italiani e francesi e nel data-base sono state contrassegnate da un COD_UNI (codice) univoco ed identificativo.

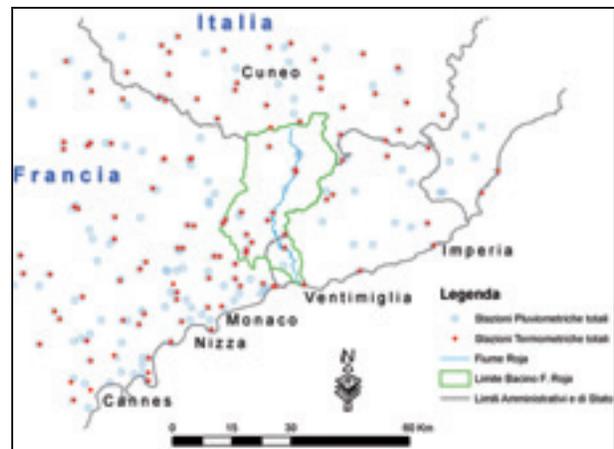


Figura 2 – Stazioni pluviometriche e termometriche totali
Figure 2 – Total rain gauge and thermometric stations

Le lacune di registrazione, incontrate per vari periodi di non funzionamento di alcuni strumenti, sono state colmate (qualora ritenute essenziali alle valutazioni) con il procedimento delle "medie analoghe di Hann" (Tonini, 1983), operando cioè sui dati che, per l'A.I. scelto (1969-1998), sono invece forniti con continuità dalle altre stazioni. Tali lacune hanno riguardato, complessivamente (per l'A.I. 1969-1998), 454 anni pari a circa il 33 % del totale delle stazioni pluviometriche e 285 anni, pari a circa il 30 % del totale per le stazioni termometriche.

2.2. Pluviometria

I dati pluviometrici sono stati organizzati in un data-base, al cui interno sono stati riportati i dati di pioggia mensili relativi a 120 stazioni (per un totale di 3270 anni, nell'Anno-Idrologico medio 1969-1998) delle quali 32 gestite del Servizio Idrografico di Genova dal 1951 al 2004 (pari ad un totale di 1056 anni), di 40 stazioni del Servizio Idrografico di Parma (dal 1951 al 2004 pari ad un totale di 740 anni), ed i dati di pioggia del Servizio Idrografico di Meteo France di 48 stazioni dal 1950 al

2004 (pari ad un totale di 1474 anni).

La distribuzione areale (soprattutto in relazione alla situazione altimetrica) delle stazioni è risultata sia all'interno del Bacino del Roja che nelle sue immediate vicinanze non rappresentativa delle quote superiori ai 1000 m; per ovviare a questo si è reso necessario ricorrere alla tecnica delle stazioni fittizie per individuare (in 6 punti posti in quota sullo spartiacque morfologico, vedi Figura 3) un regime pluviometrico spaziale più adeguato alla locale situazione morfologica. A tali stazioni fittizie si sono attribuiti i valori di pioggia calcolati mediante la ricostruzione di gradienti pluviometrici locali, attraverso una funzione matematica lineare di tipo logaritmico in grado di correlare l'andamento pluviometrico rispetto alla quota. Con tali integrazioni le elaborazioni effettuate hanno consentito di ricavare un valore medio annuo di pioggia a livello di bacino pari a 1104 mm attraverso la redazione della carta delle isoiete di Figura 3 costruita con le tecniche di *gridding* e *contouring*.

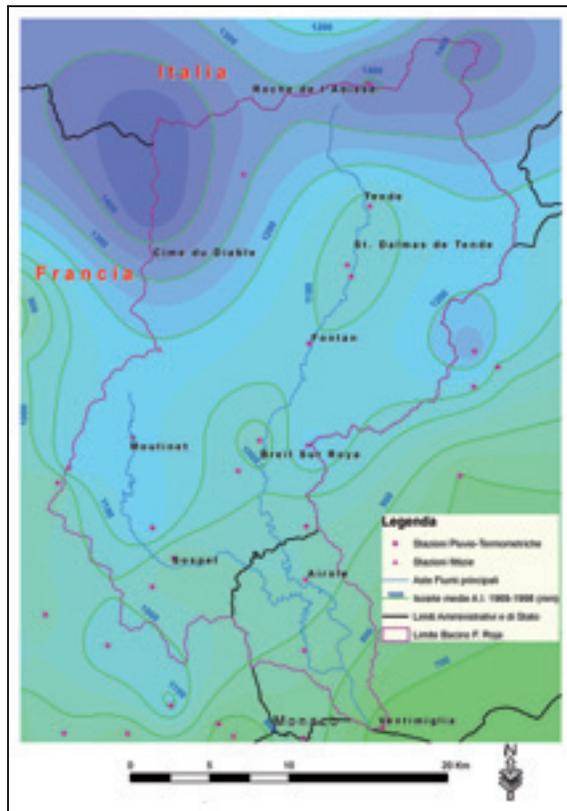


Figura 3 – Carta delle precipitazioni medie annue riferite all'anno idrologico medio (1969-1998)
 Figure 3 – Map of the average annual rainfall related to average hydrological year (1969-1998)

2.3. Termometria ed Evapotraspirazione reale

Anche i dati termometrici sono organizzati in un database, al cui interno sono stati riportati i dati di temperatura media relativi a 77 stazioni dal 1950 al 2004 per un totale di 1568 anni, delle quali 19 gestite dal Servizio I-

drografico di Genova dal 1951 al 2004 pari ad un totale di 556 anni, 29 stazioni gestite dal Servizio Idrografico di Parma dal 1951 al 2004 pari ad un totale di 192 anni e 29 stazioni gestite dal Servizio Idrografico di Meteo France dal 1950 al 2004 pari ad un totale di 817 anni.

Per la valutazione delle temperature medie mensili ed annue relative all'area in esame, ci si è basati sui dati registrati in 32 delle 77 stazioni per un numero totale di 668 anni osservati (Figura 4).

Al fine di omogeneizzare il network termometrico con quello pluviometrico, sono state valutate le temperature medie anche per quelle pluviometriche sprovviste di termometro. Per fare ciò, la ricostruzione dei valori di temperatura delle stazioni è stata effettuata attraverso un modello di correlazione lineare $T_{\text{temperature}} \text{ vs } H_{\text{quote}}$, vale a dire $T = a + (b \times H)$. La distribuzione areale delle temperature, ricavate secondo le tecniche di *gridding* e *contouring*, per il bacino del fiume Roja, è rappresentata in Fig. 4.

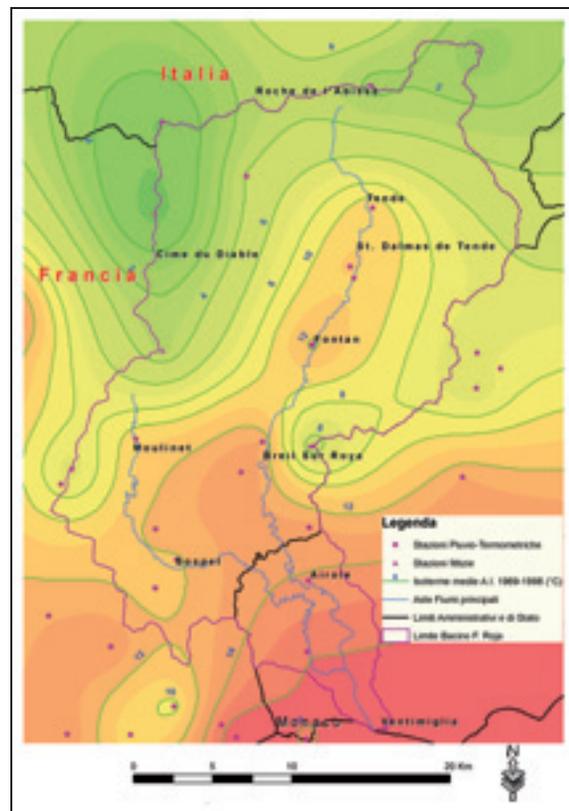


Figura 4 – Carta delle temperature medie annue riferite all'anno idrologico medio (1969-1998)
 Figure 4 – Map of the average annual temperatures related to the average hydrological year (1969-1998)

Con i dati termometrici così integrati si è così potuto procedere al calcolo dell'evapotraspirazione reale (E_r), intendendosi con tale termine la quantità d'acqua effettivamente restituita all'atmosfera sotto forma di vapore, sia per evaporazione diretta che per traspirazione delle piante, all'interno della zona considerata, e questo per ogni

singola stazione utilizzata sia per la pluviometria che per la termometria.

La valutazione dell'evapotraspirazione reale è stata eseguita in base alla metodologia proposta da Thornthwaite & Mather (1957).

Come è noto, tale metodo si basa sul calcolo dell'evapotraspirazione potenziale media mensile (E_{pm}), intendendo con questo termine la quantità d'acqua che evaporerrebbe nel caso in cui, superficialmente, ve ne fosse sempre una disponibilità sufficiente: detto calcolo è fondato sulla relazione sperimentale esistente tra E_{pm} e la corrispondente temperatura (T_m). L'equazione proposta, che fornisce E_{pm} in mm, è la seguente:

$$E_{pm} = K \times 16 \times (10 \times T_m / I)^\alpha$$

dove:

K = coefficiente mensile che tiene conto delle ore di insolazione media mensile ed è funzione della latitudine;

I = indice termico annuale, pari alla sommatoria degli indici mensili (i); $i = (T_m/5)^{1,514}$

α = funzione cubica dell'indice termico annuale data da:

$$\alpha = 0,49239 + (1,792 \times 10^{-5} \times I) - (771 \times 10^{-7} \times I^2) + (675 \times 10^{-9} \times I^3)$$

L'evapotraspirazione potenziale media annua (E_p) si ottiene come somma dei singoli valori mensili.

Successivamente, la determinazione dell'evapotraspirazione reale (E_r) avviene attraverso una procedura indiretta, per la quale ad essa si arriva in funzione di un meccanismo di calcolo subordinato sia alla quantità delle precipitazioni, sia alla capacità di ritenuta dell'acqua da parte del suolo (funzione del tipo di terreno e di vegetazione presente).

Operando in maniera analoga a quanto visto per le piogge, è stata ottenuta la carta dell'evapotraspirazione reale (Figura 5). L'esame di questa evidenzia che i valori massimi di E_r (> di 600 mm) si riscontrano nella parte centrale del bacino (Breil Sur Roja, Fontan). I suoi valori minimi si rilevano invece nelle zone di alta montagna con valori inferiori ai 400 mm. Il valore medio per l'intero bacino è risultato pari a 548 mm (circa il 49 % delle precipitazioni), pari a circa $367 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$.

3. Deflussi

Lungo l'asta del F. Roja e del F. Bevera, hanno funzionato in periodi diversi 5 stazioni idrometriche gestite sia dal Servizio Idrografico di Genova, che dal Servizio di Stato francese, i cui periodi di funzionamento hanno condizionato la scelta dell'A.I. di riferimento per la valutazione delle risorse idriche del bacino (1969-1998).

La valutazione di questo parametro di bilancio, relativamente al Bacino del fiume Roja e ai principali sottobacini (Figura 6), è stata eseguita in due modi diversi:

1) utilizzando i dati idrometrici registrati presso le sezioni fluviali di Torri, S. Dalmat e Breil (riferiti

all'Anno Idrologico medio 1969-1998):

2) adottando una metodologia indiretta che risale ad essi per mezzo della stima del coefficiente di deflusso medio annuo Cd ($Cd = D/P$), effettuata in funzione di alcune caratteristiche fisiografiche e climatiche puntuali dei bacini esaminati (Cd fisiografico, Barazzuoli et alii 1989, 1994, 2000).

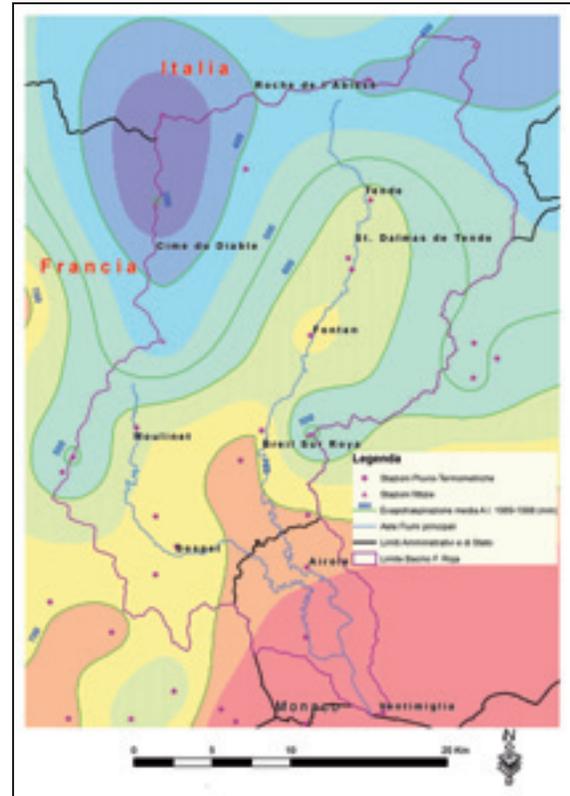


Figura 5 - Carta dell' Evapotraspirazione reale media annua riferita all'anno idrologico medio (1969-1998)

Figure 5 - Map of the average annual actual evapotranspiration related to the average hydrological year (1969-1998)

3.1. Deflussi strumentali (Ds) e regime dei principali corsi d'acqua

I deflussi strumentali utilizzati derivano dai dati di portata registrati nelle stazioni idrometrografiche utilizzate.

Dopo un'attenta analisi del regime delle portate massime, minime e medie di Breil, S. Dalmat e Torri, sui contributi unitari medi, sul confronto afflussi vs deflussi, è apparsa chiara una differenza nel regime tra il F. Bevera ed il F. Roja.

Queste differenze nel regime dei due corsi d'acqua possono essere imputabili:

1. a cause naturali; essenzialmente agli afflussi nevosi molto più copiosi nel Roja che nel suo affluente Bevera. Questi si traducono in termini di deflusso temporalmente sfasati rispetto alle precipitazioni che li hanno generati.

2. a cause antropiche essenzialmente attribuibili a sbarramenti artificiali e condotte ad uso idroelettrico dell'area dell'alto Roja (a monte di S. Dalmat e di Breil).

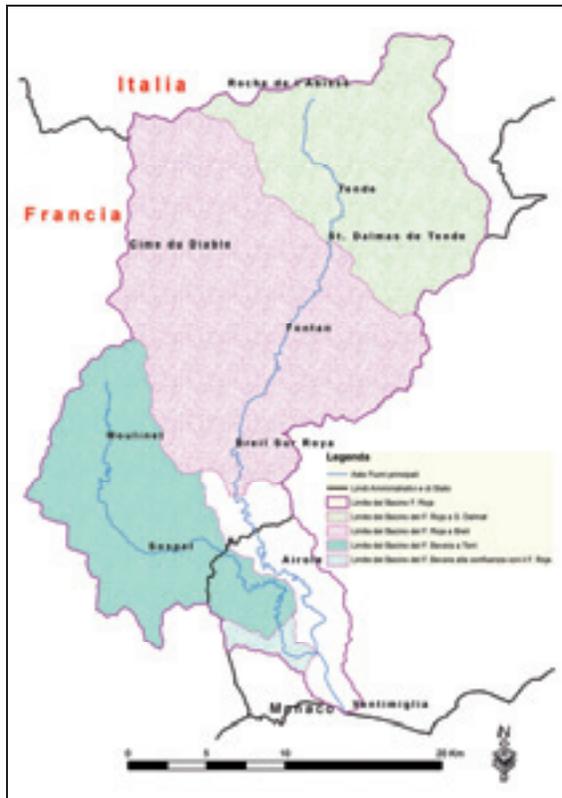


Figura 6 – Limiti del Bacino e dei sottobacini del Fiume Roja
Figure 6 – Limits of Roja river basin and sub-basins

L'uso idroelettrico, però, non da luogo a consumi d'acqua e le alterazioni si traducono solo in un lisciamiento delle portate massime e minime (regimazione). Stante ciò le misure indicano un deflusso medio annuo che, sempre in relazione all'A.I. 1969-1998, è di $88 \times 10^6 \text{ m}^3$ per il Roja a S. Dalmat, $372 \times 10^6 \text{ m}^3$ per il Roja a Breil e $76 \times 10^6 \text{ m}^3$ per il Bevera a Torri.

3.1.1. Ricostruzione dei Deflussi strumentali del Roja alla Foce

Per giungere ad una più corretta valutazione delle risorse idriche riferibili all'intero bacino del Roja, si è proceduto ad una valutazione indiretta del deflusso strumentale del fiume in corrispondenza della Foce tramite la ricerca di una correlazione Deflusso vs Superficie, una sia per il Bacino del Bevera che per quello del Bacino del Roja (escluso il contributo del fiume Bevera). La miglior correlazione ricavata, tenendo conto dei contributi annui al deflusso dei vari sottobacini attraversati (S. Dalmat, Breil e Torri) e monitorati, è risultata, per ambedue i fiumi, quella di tipo lineare.

3.2. Deflusso fisiografico (Df)

La valutazione dei deflussi competenti ad un bacino idro-

grafico può essere effettuata attraverso una metodologia che, prescindendo da limitazioni territoriali e strumentali, offre la possibilità di risalire ad essi per mezzo della stima del coefficiente di deflusso effettuata in funzione ad alcune caratteristiche fisiografiche e climatiche (Barazzuoli et alii, 1986, 1987a, 1987b, 1989, 1994, 1995) dell'area esaminata. Il metodo consiste nel calcolare il coefficiente di deflusso medio annuo Cdf ($Cdf = Df/P$) di un bacino come somma di tre componenti (C_a , C_v , C_p) relative all'influenza esercitata sul deflusso rispettivamente dall'acclività, dalla copertura vegetale e dalla permeabilità.

Per ognuna delle tre componenti, il contributo al Cdf è ricavato da carte tematiche (Figure 7, 8 e 9), dove i valori del parametro considerato sono ripartiti in classi, a ciascuna delle quali è attribuito un particolare coefficiente in funzione delle caratteristiche climatiche generali della zona espresse dall'indice di aridità medio annuo (Ia).

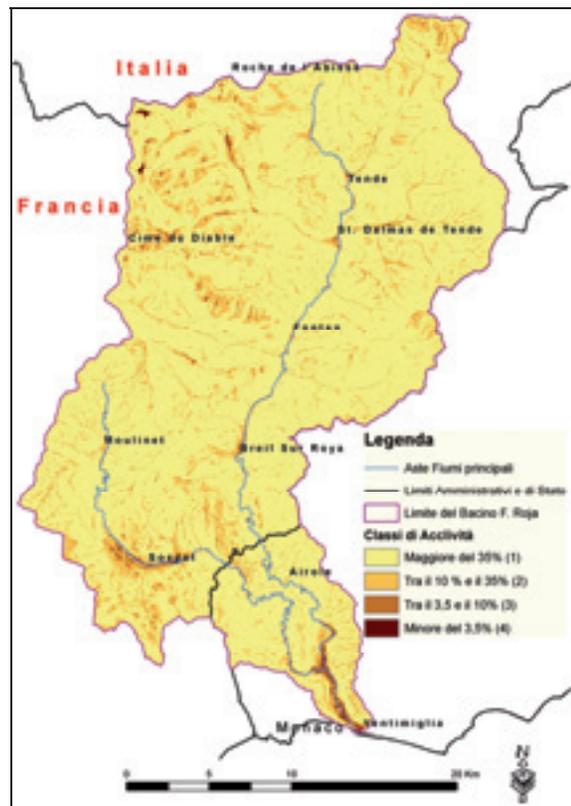


Figura 7 – Classi di Acclività secondo il metodo Kennessey
Figure 7 – Slope classes according to the Kennessey method

4. Confronto tra Cd fisiografico e Cd strumentale

Come già accennato, il valore del coefficiente di deflusso su basi fisiografiche si ottiene dalla somma dei singoli contributi apportati dalle anzidette tre componenti:

$$Cdf = C_a + C_v + C_p$$

Si deve osservare che il Cdf (fisiografico), non è altro

che un valore rappresentativo della “potenzialità” di deflusso superficiale e che perciò sarà tanto più simile al Cds (strumentale) quanto meno influiranno quelle condizioni (antropiche e/o naturali) capaci di provocare delle variazioni importanti nella misura dei volumi idrici di deflusso, vale a dire:

1 Interventi antropici sul bacino in relazione all’uso dell’acqua che possono portare variazione sia positive sia negative al valore del deflusso;

2 Possibili cospicui scambi idrici sotterranei con l’esterno del bacino legati alla mancanza di coincidenza con lo spartiacque morfologico e quello idrogeologico (acque sotterranee in entrata nel Bacino esaminato).

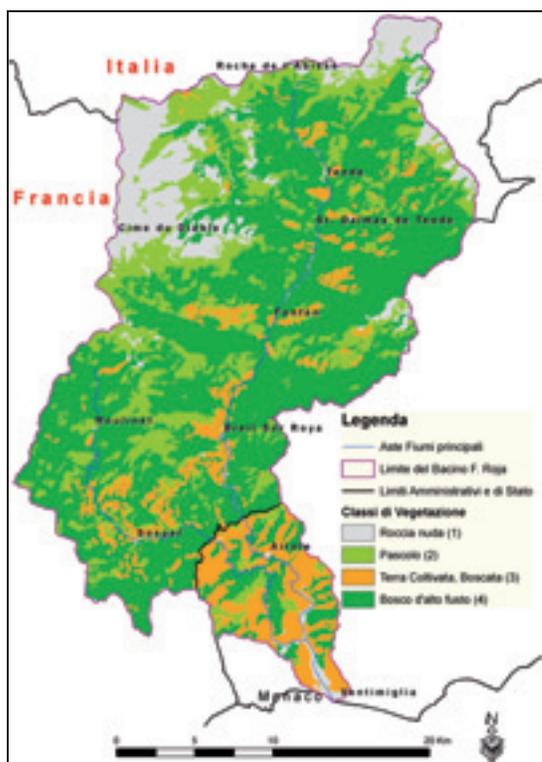


Figura 8 - Carta della Vegetazione secondo il metodo Kennessey
 Figure 8 – Vegetation classes according to the Kennessey method

In definitiva, il Cds (Cd strumentale) non deve essere ritenuto espressione della sola potenzialità di deflusso del bacino in esame, ma la risultante di tutti gli interventi naturali ed antropici che in questo possono intervenire. Infatti, in relazione alle suddette condizioni, esso può presentare valori maggiori o minori di quelli dovuti alle sole caratteristiche fisiografiche locali interne al Bacino (dalle quali dipende invece il Cdf).

Tutte le verifiche effettuate in oltre 30 bacini idrografici hanno confermato che il deflusso fisiografico corrisponde a quello totale naturale al netto dei quantitativi idrici sotterranei scambiati con i bacini adiacenti, assu-

mendo così le caratteristiche di deflusso derivante dai soli apporti pluviometrici interni al bacino idrografico ($D_i = \text{“deflusso da precipitazioni interne”}$ e quindi $D_f = D_i$), e che quindi esso non può assumere valori maggiori dell’eccedenza idrica.

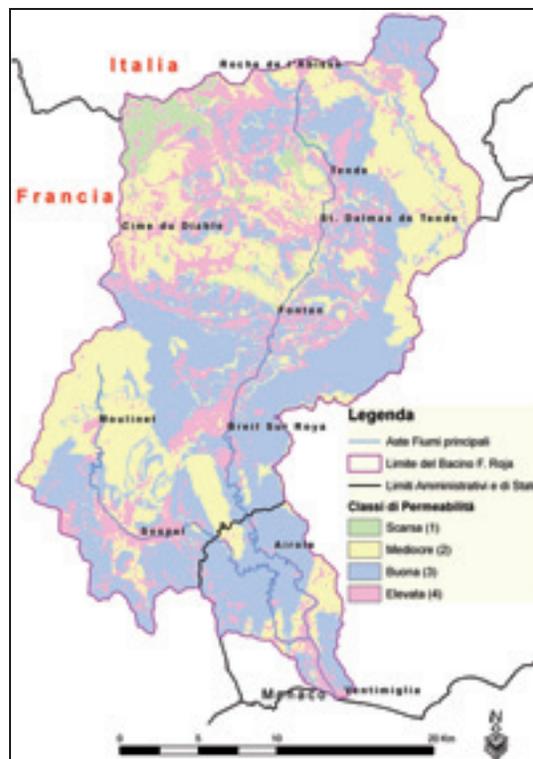


Figura 9 – Classi di permeabilità secondo il metodo Kennessey
 Figure 9 – Permeability classes according to the Kennessey method

I risultati ricavati per il Bacino ed i sottobacini del F. Roja per l’A.I. di riferimento, individuando Cdf sempre inferiori o uguali al CdWs (Tabella 1), soddisfano tale condizione e possono, quindi, ritenersi rappresentativi del deflusso interno dei relativi bacini; essi sono, conseguentemente, utilizzabili per la stesura dei bilanci idrici e la valutazione delle risorse idriche medie sia superficiali che sotterranee (Barazzuoli et alii, 1986, 1987a, 1987b, 1989, 1994, 1995, 2000).

5. Bilanci Idrici: Valutazione delle Risorse Idriche Rinnovabili

La valutazione delle risorse idriche complessive del Bacino del Fiume Roja e la loro ripartizione in superficiali e sotterranee è stata effettuata con i criteri proposti in Barazzuoli & Salleolini (1992) e Barazzuoli et alii (1994, 1995).

5.1 Risorse idriche superficiali e sotterranee tramite il bilancio idrico

Sulla base dei dati idroclimatici raccolti è stata eseguita la

valutazione delle risorse idriche superficiali e sotterranee presenti nel Bacino del Fiume Roja, attraverso l'analisi integrata dei Bilanci idrici (per l'A.I. 1969-1998) redatti con l'utilizzo di varie tipologie di deflusso: strumentale (Ds), interno o fisiografico (Di=Df) e comunque secondo lo schema concettuale illustrato in Figura 10 (alla didascalia di Figura 11 si faccia invece riferimento per l'identificazione delle sigle di seguito riportate).

Tabella 1 – Confronto tra i tre coefficienti di deflusso (Cf, Cs, Cws)

Table 1 – Comparison between the three runoff coefficients (Cf, Cs, Cws)

Bacino e Sottobacino idrografico	Cf (-)	Cs (-)	Cws (-)
Roja a S. Dalmat	0,553	0,448	0,570
Roja a Breil	0,544	0,711	0,544
Bevera a Torri	0,438	0,499	0,462
Bevera alla Confluenza	0,433	0,543	0,445
Roja alla Foce	0,503	0,682	0,504

Il bilancio, eseguito utilizzando il deflusso strumentale (Ds), quasi mai fornisce una valutazione veritiera circa l'entità delle risorse idriche del bacino, salvo i casi, a dir vero rari, in cui si abbia a che fare con bacini aventi scambi idrici sotterranei irrilevanti o nulli per quanto riguarda l'acqua in entrata per via sotterranea (Ise=0). Esso, però ci offre un primo quadro della situazione idrogeologica del bacino nel senso che:

- a) se I_e annua $\gg 0$, vorrà dire che I_e è molto superiore alla I_{se} (se presente);
- b) se I_e annua ca. = 0, vorrà dire che I_e e I_{se} (se presenti) sono dello stesso ordine di grandezza;
- c) se I_e annua $\ll 0$, vorrà dire che I_{se} è molto superiore alla I_e (se presente);

In ogni caso è bene ricordare che il valore di I_e annuo rappresenta sempre un saldo tra le entrate e le uscite di acqua sotterranea dal bacino.

I bilanci sono stati effettuati su tutti i sottobacini del Fiume Roja e dai loro risultati è stato possibile desumere, attraverso gli opportuni confronti e verifiche previste dalla metodologia già illustrata (figura 10), l'entità delle risorse superficiali e sotterranee anche in rapporto a possibili collegamenti sotterranei con i bacini limitrofi.

Qui di seguito verranno illustrati in dettaglio solo i risultati relativi all'intero bacino.

5.2. Sintesi delle valutazioni di Bilancio Idrico: Bacino del Fiume Roja alla Foce

Dall'analisi del bilancio riportato nella sottostante Figura 11 (11a e 11b = schemi di calcolo del Bilancio; 11c = schema concettuale per le interpretazioni del Bilancio e la valutazione della risorsa superficiale e sotterranea) e sintetizzate in Tabella 2 è possibile evincere che, con riferimento all'A.I. 1969-1998, l'eccedenza idrica (Ws) risulta pari a circa $372 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ (50% delle precipitazioni, P) di risorsa rinnovabile e potenzialmente utilizzabile. Questa, in relazione al Bilancio effettuato con il Df (risorsa idrica reale) ed opportunamente comparato con quello strumentale, può essere ripartita in:

- una risorsa totale superficiale (R), dovuta al ruscellamento diretto dell'acqua lungo la rete idrografica, stimabile in circa $235 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$;
- una risorsa totale sotterranea potenziale interna (I-ti), stimabile in circa $137 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, e che corrisponde alla quantità d'acqua di infiltrazione nei terreni permeabili affioranti nel bacino. Tale risorsa è a sua volta suddivisibile in I_e (da ritenersi, nel bacino in oggetto complessivamente assente), che rappresenta la perdita apparente d'acqua sotterranea verso falde emergenti in bacini limitrofi o defluenti direttamente in mare, ed I_{si} (pari a $137 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$), che costituisce invece quella parte di infiltrazione totale interna alimentante falde emergenti dentro

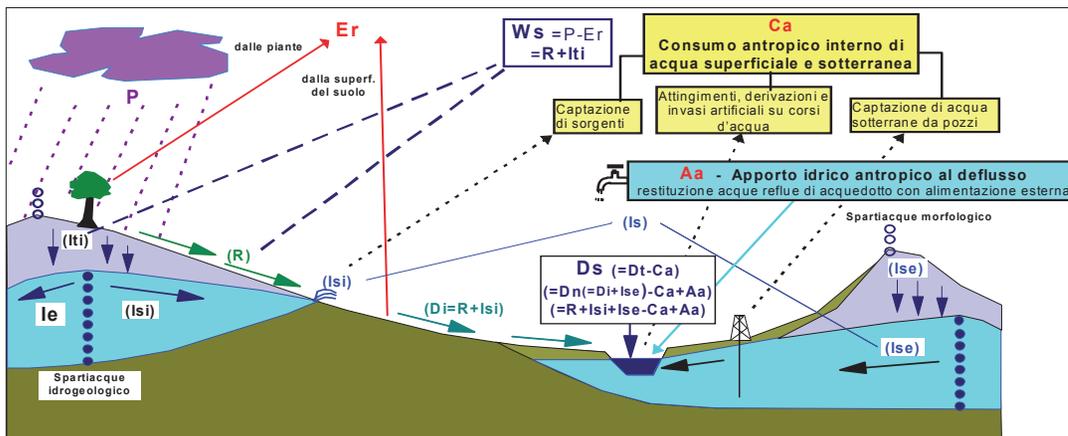


Figura 10 - Schematizzazione concettuale dei rapporti tra i parametri che contribuiscono a definire le risorse idriche di un bacino idrografico (da Barazzuoli et Al., 2000)

Figure 10 – Conceptual diagram of relationships between the parameters that help define the water resources in a river basin

il Bacino del F.Roja e che è, quindi, la risorsa sotterranea interna.

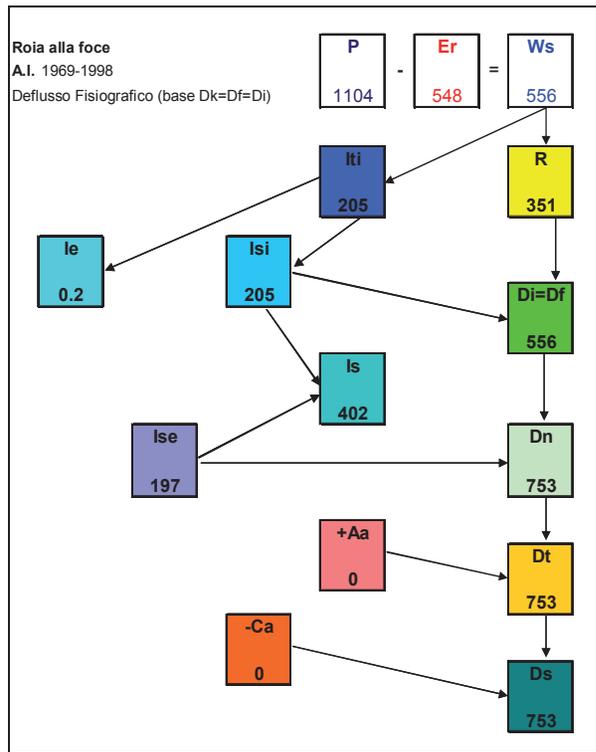


Figura 11 - a) Tabella di bilancio (secondo Thornthwaite & Mather, 1957) e (b, c) di schemi esplicativi dei criteri di calcolo utilizzati per la stima delle risorse idriche superficiali e sotterranee a livello di bacino idrografico (secondo Barazzuoli & Salleolini, 1992; Barazzuoli et alii, 1994, 1995) per l'A.I. 1969-1998: P = afflussi; T = temperatura media dell'aria; i = indice calorico; E_p = evapotraspirazione potenziale; K = coefficiente di correzione astronomica; E_{pc} = evapotraspirazione potenziale corretta; D.id.C = deficit idrico potenziale cumulado; r = riserva idrica del suolo; E_r = evapotraspirazione reale; W_s = eccedenza, rappresenta la risorsa totale potenziale interna al bacino ($P-E_r$ oppure $R+I_{ti}$); d_a = deficit agrario; D_i = deflusso interno in uscita dal bacino attraverso la rete idrografica. In prima approssimazione, questa grandezza può essere valutata direttamente con le misure rilevate nella stazione idrometrografica ($D_i = D_s$). In realtà, esso rappresenta il quantitativo idrico di deflusso, dovuto sia al ruscellamento superficiale che al contributo di acqua sotterranea, direttamente riconducibile alle precipitazioni interne al bacino (del quale costituisce quindi la risorsa totale interna, $R+I_{si}$). Esso può essere valutato per mezzo della stima del coefficiente di deflusso effettuata in funzione ad alcune caratteristiche fisiografiche e climatiche dell'area esaminata (D_f); I_e = infiltrazione efficace, calcolata con la differenza W_s-D_i , rappresenta la porzione di I_{ti} che alimenta falde emergenti all'esterno del bacino (nel caso di coincidenza tra spartiacque morfologico ed idrogeologico e in assenza di intervento antropico sul ciclo dell'acqua, I_e è uguale a zero e quindi $W_s = D_i$); I_{ti} = infiltrazione totale interna, valutata con la somma dei valori mensili positivi d'infiltrazione ricavati dal bilancio o con l'ausilio dei coefficienti di infiltrazione potenziale (I_e+I_{si}), è la risorsa totale potenziale sotterranea interna; I_{si} = infiltrazione delle emergenze interne,

valutata con la somma dei valori mensili negativi d'infiltrazione ricavati dal bilancio o con l'ausilio dei coefficienti di infiltrazione potenziale, rappresenta il contributo delle acque sotterranee interne (sorgenti, falde che emergono direttamente verso corsi d'acqua, ruscellamento ipodermico) al deflusso del bacino, assumendo così le caratteristiche di reale risorsa sotterranea interna; R = ruscellamento superficiale, stimato con la differenza W_s-I_{ti} , corrisponde alla porzione di W_s che alimenta direttamente la rete idrografica (costituisce cioè la risorsa totale superficiale interna); I_{se} = emergenze da infiltrazione esterna, calcolato con la differenza D_n-D_i , corrisponde all'eventuale contributo di acque sotterranee al deflusso provenienti da falde alimentate in bacini adiacenti; I_s = contributo totale di acqua sotterranea al deflusso, valutato con la somma $I_{si}+I_{se}$; D_n = deflusso naturale in uscita dal bacino attraverso la rete idrografica, determinato direttamente con le misure rilevate nella stazione idrometrografica, è la risorsa totale del bacino (D_i+I_{se} oppure $R+I_{si}+I_{se}$); A_a = apporto idrico esterno di origine antropica al deflusso del bacino, rappresenta un quantitativo d'acqua da sottrarre al deflusso strumentale (D_s , cioè misurato) per ricavare quello naturale (D_i-D_n); D_t = deflusso totale, che è costituito dai contributi naturali (sia interni D_i che esterni I_{se} , cioè D_n) con l'aggiunta dell'apporto esterno antropico A_a e che coincide con il deflusso strumentale (D_s) in assenza di consumo interno antropico C_a (D_n+A_a oppure $D_i+I_{se}+A_a$ oppure $R+I_{si}+I_{se}+A_a$); C_a = consumo idrico interno di origine antropica, rappresenta un quantitativo idrico da sommare al deflusso strumentale (D_s , cioè misurato) per ricavare quello naturale (D_i-D_s); D_s = deflusso strumentale, misurato alla stazione idrometrografica posta alla sezione di chiusura del bacino, il cui valore deriva dal saldo di tutte le interferenze naturali ed antropiche al bacino (sia interne che esterne) e che corrisponde al deflusso naturale residuo (cioè, D_n al netto dei consumi C_a) sommato agli apporti A_a (D_i-C_a oppure $D_n-C_a+A_a$ oppure $D_i+I_{se}-C_a+A_a$ oppure $R+I_{si}+I_{se}-C_a+A_a$).

Figure 11 - a) Balance table (according to Thornthwaite & Mather, 1957) and b), c) explanatory diagrams of the calculation criteria used for the assessment of the surface water and groundwater resources, at watershed level (according to Barazzuoli & Salleolini, 1992; Barazzuoli et alii, 1994, 1995) average hydrological year 1969-1998: P = precipitation; T = average air temperature; i = heat index; E_p = potential evapotranspiration; K = coefficient of astronomical correction; E_{pc} = corrected potential evapotranspiration; D.id.C = accumulated potential water deficit; r = soil moisture; E_r = actual evapotranspiration; W_s = water surplus represents the total potential resource within the basin ($P-E_r$ or $R+I_{ti}$); d_a = agricultural deficit; D_i = Internal flow leaving the basin through the hydrographic network.

As a first approximation, this magnitude can be evaluated directly with the measurements taken in the hydrometric stations ($D_i = D_s$). In reality, it represents the quantity of water runoff due to both surface runoff and to the contribution of groundwater, directly attributable to precipitation within the basin (of which it therefore forms the total internal resource, $R+I_{si}$).

It can be evaluated by carrying out an estimate of the runoff coefficient according to certain climatic and physiographic characteristics of the area examined (D_f);

I_e = effective infiltration, calculated with the difference W_s-D_i , represents the part of I_{ti} that feeds aquifers emerging outside the basin (if the morphological and hydrogeological watersheds coincide and in the absence of human intervention on the water

cycle, I_e is equal to zero and then $W_s = D_i$);

I_{ti} = total internal infiltration, evaluated with the sum of the monthly positive infiltration values obtained from the balance or using the potential infiltration coefficients ($I_e + I_{si}$), is the potential total underground internal resource;

I_{si} = infiltration of internal springs, estimated with the sum of the monthly negative infiltration values obtained from the balance or with the help of potential infiltration coefficients, represents the contribution of the internal groundwater (springs, aquifers that flow directly towards watercourses, subsurface runoff) to the basin runoff and therefore is the actual internal groundwater resource;

R = surface runoff, estimated by the difference $W_s - I_{ti}$, corresponds to the part of W_s that directly feeds the hydrographic network (therefore it is the total internal surface resource);

I_{se} = springs from external infiltration, calculated by the difference $D_n - D_i$, this corresponds to the possible contribution to runoff made by the groundwater from aquifers that are fed in adjoining basins;

I_s = total groundwater contribution to runoff, calculated by the sum of $I_{si} + I_{se}$;

D_n = natural runoff leaving the basin through the hydrographic network, determined directly by the measurements of the hydrometric station, is the total resource of the basin ($D_i + I_{se}$ or $R + I_{si} + I_{se}$);

A_a = external anthropogenic contribution to the basin's runoff, represents a quantity of water to be deducted from the measured runoff (D_s) in order to obtain natural runoff ($D_t - D_n$);

D_t = total runoff, is composed of the natural contributions (both internal D_i and external I_{se} , i.e. D_n) and the external anthropogenic contribution A_a and, therefore, coincides with the measured runoff (D_s) in the absence of internal anthropogenic consumption C_a ($D_n + A_a$, $D_i + I_{se} + A_a$ or $R + I_{si} + I_{se} + A_a$);

C_a = internal anthropogenic water consumption, represents a quantity of water to be added to the measured runoff (D_s , i.e. measured) in order to obtain (D_s , that is measured) in order to obtain natural consumption ($D_t - D_n$);

D_s = measured runoff, at the hydrometric station located at the section of closure of the basin, its value derives from the balance of all natural and anthropogenic interference in the basin (both internal and external) which corresponds to the residual natural runoff (i.e. D_n net of consumption C_a) added to the contributions A_a ($D_t - C_a$, $D_n - C_a + A_a$, $D_i + I_{se} - C_a + A_a$ or $R + I_{si} + I_{se} - C_a + A_a$).

E' bene precisare che tali valori di risorsa sotterranea non comprendono solo le portate delle sorgenti individuabili come tali, ma anche quelle relative ad emergenze diffuse, al ruscellamento ipodermico ed all'alimentazione diretta del fiume da parte delle falde ad esso idraulicamente collegate.

La somma dei quantitativi idrici di risorsa superficiale (R) e di quella sotterranea interna (I_{si}) rappresenta la risorsa totale interna o deflusso interno ($D_i = R + I_{si} = 372 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$); la somma di quest'ultima grandezza con l'eventuale apporto sotterraneo esterno (I_{se}) definisce invece la risorsa rinnovabile totale naturale o deflusso naturale D_n (in pratica, $D_n = D_i + I_{se}$). Avendo stimato il valore dei contributi sotterranei esterni (I_{se}) in ca. $132 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, il deflusso naturale (D_n) è stimabile in $504 \times$

$10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$; questo in virtù di apporti e consumi antropici considerati nulli ($A_a = 0$; $C_a = 0$).

Tabella 2 – Riassunto della valutazione delle risorse idriche con C_{ds} e C_{dk} tramite i calcoli di bilancio con i vari tipi di deflusso per il Bacino del Roja alla Foce

Table 2 – Summary of the evaluation of water resources by C_{ds} and C_{dk} through balance calculations with various types of runoff for the Roja basin at the mouth

TABELLA RIASSUNTIVA DELLA VALUTAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE			
BACINO DEL FIUME	Roia alla foce	A.I.	1969-1998
VALORI IN MILIONI DI MC/ANNO			CdS CdK
Afflussi	P	739	739
Evapotraspirazione Reale	Er	367	367
Eccedenza Idrica	Ws	372	372
Infiltrazione totale	Iti	81	137
Infiltrazione efficace	le	0	0
Contributo sorgenti interne	Isi	81	137
Ruscellamento	R	291	235
Deflusso da contributi interni	Di	372	372
Contributo sorgenti esterne	Ise	132	132
Contributo sorgenti totale	Is	213	269
Deflusso naturale	Dn	504	504
Apporti idrici esterni Antropici	Aa	0	0
Deflusso totale	Dt	504	504
Consumi idrici Antropici	Ca	0	0
Deflusso strumentale	Ds	504	504

Vista la presenza di alcuni interventi di tipo antropico nel regime dei deflussi (dighe con centrali idroelettriche), si è reputato utile (anche al fine di confrontare i dati misurati) elaborare i modelli di bilancio con i valori di deflusso di S. Dalmat, di Breil e quelli ricostruiti alla Foce del Fiume Roja corretti e ripartiti secondo le caratteristiche del bacino del Bevera alla stazione idrometrografica di Torri privo di sbarramenti artificiali. Il confronto tra i diversi bilanci è osservabile nelle Tabelle 3 e 4.

Come era prevedibile le differenze che si osservano riguardano la ripartizione della risorsa totale potenziale interna del Bacino (W_s), sia in termini di risorsa superficiale (R), che in termini di risorsa sotterranea (I_{ti}).

Infatti se si analizza il bacino di San Dalmat si può vedere come il ruscellamento superficiale passa dal 38% (rispetto alle precipitazioni P) al 46% (percentuale valutata correggendo il regime del deflusso secondo quello registrato a Torri), mentre, ovviamente, il quantitativo della risorsa sotterranea diminuisce passando dal 19% all'11% (sempre rispetto alle precipitazioni P).

Anche alla foce si assiste al medesimo fenomeno: il ruscellamento aumenta passando dal 32% (nel caso del deflusso non corretto) al 42%, mentre l' I_{ti} diminuisce passando dal 19% a circa il 9% (nel caso del deflusso corretto) delle precipitazioni.

Tabella 3 – Risultato dei Bilanci per il Bacino del Roja alla Foce e dei suoi sottobacini con l'utilizzo del Di (risorsa reale) confrontabili con i valori dei deflussi strumentali non corretti

Table 3 – Water balances for the Roja basin at the mouth and its sub-basins with the use of Di (actual resources) compared with the non corrected values of measured runoff

TABELLA RIASSUNTIVA DELLA VALUTAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE A.I. 1969-1998 (non-corretto)						
BACINO DEL FIUME ROJA		Bevera a Torri	Bevera a Confluenza Roia	Roia a S. Dalmat	Roia a Breil	Roia alla foce
VALORI IN MILIONI DI MC/ANNO		CdK				
	km ²	149,9	159,7	166,8	454,4	668,9
Afflussi	P	153	161	196	523	739
Evapotraspirazione Reale	Er	82	90	85	238	367
Eccedenza Idrica	Ws	71	72	112	285	372
Infiltrazione totale	Iti	20	19	37	101	137
Infiltrazione efficace	Ie	4	2	3	0	0
Contributo sorgenti interne	Isi	17	17	34	101	137
Ruscigliamento	R	50	52	75	184	235
Deflusso da contributi interni	Di	67	70	109	285	372
Contributo sorgenti esterne	Ise	9	18	0	87	132
Contributo sorgenti totale	Is	26	35	34	188	269
Deflusso naturale	Dn	76	88	109	372	504
Apporti idrici esterni Antropici	Aa	0	0	0	0	0
Deflusso totale	Dt	76	88	109	372	504
Consumi idrici Antropici	Ca	0	0	21	0	0
Deflusso strumentale	Ds	76	88	88	372	504

Tabella 4 – Risultato dei Bilanci per il Bacino del Roja alla Foce e dei suoi sottobacini con l'utilizzo del Di (risorsa reale) confrontabili con i valori dei deflussi strumentali corretti

Table 4 – Water balances for the Roja basin at the mouth and its sub-basins with the use of Di (real resource) compared with the values of the corrected measured runoff

TABELLA RIASSUNTIVA DELLA VALUTAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE A.I. 1969-1998 (corretto)						
BACINO DEL FIUME ROJA		Bevera a Torri	Bevera a Confluenza Roia	Roia a S. Dalmat	Roia a Breil	Roia alla foce
VALORI IN MILIONI DI MC/ANNO		Cdi				
	km ²	149,9	159,7	166,8	454,4	668,9
Afflussi	P	153	161	196	523	739
Evapotraspirazione Reale	Er	82	90	85	238	367
Eccedenza Idrica	Ws	71	72	112	285	372
Infiltrazione totale	Iti	20	19	21	45	63
Infiltrazione efficace	Ie	4	2	3	0	0
Contributo sorgenti interne	Isi	17	17	18	45	62
Ruscigliamento	R	50	52	91	240	309
Deflusso da contributi interni	Di	67	70	109	285	372
Contributo sorgenti esterne	Ise	9	18	0	87	132
Contributo sorgenti totale	Is	26	35	18	132	194
Deflusso naturale	Dn	76	88	109	372	504
Apporti idrici esterni Antropici	Aa	0	0	0	0	0
Deflusso totale	Dt	76	88	109	372	504
Consumi idrici Antropici	Ca	0	0	21	0	0
Deflusso strumentale	Ds	76	88	88	372	504

La motivazione delle differenze tra i due tipi di valutazioni risiede nel fatto che con tale correzione si va ad ipotizzare, anche nei sottobacini di S. Dalmat e Breil, un clima più temperato e caratterizzato da minori quantitativi di precipitazioni di tipo nevoso, come avviene per il sottobacino del Bevera a Torri. La neve, che però è comunque presente durante l'anno all'interno dei due sottobacini, viene pertanto "contabilizzata" dal modello come

risorsa sotterranea, "immagazzinata" per un certo periodo dal bacino (Iti), che poi "riemerge" e contribuisce al deflusso interno dello stesso ($Di=Dn=R+Is$) simulando un contributo di "acqua sotterranea" al Deflusso. Quindi è concettualmente più corretto valutare le risorse del Bacino utilizzando i "deflussi non corretti" in quanto più rappresentativi dell'andamento climatologico dell'area in esame.

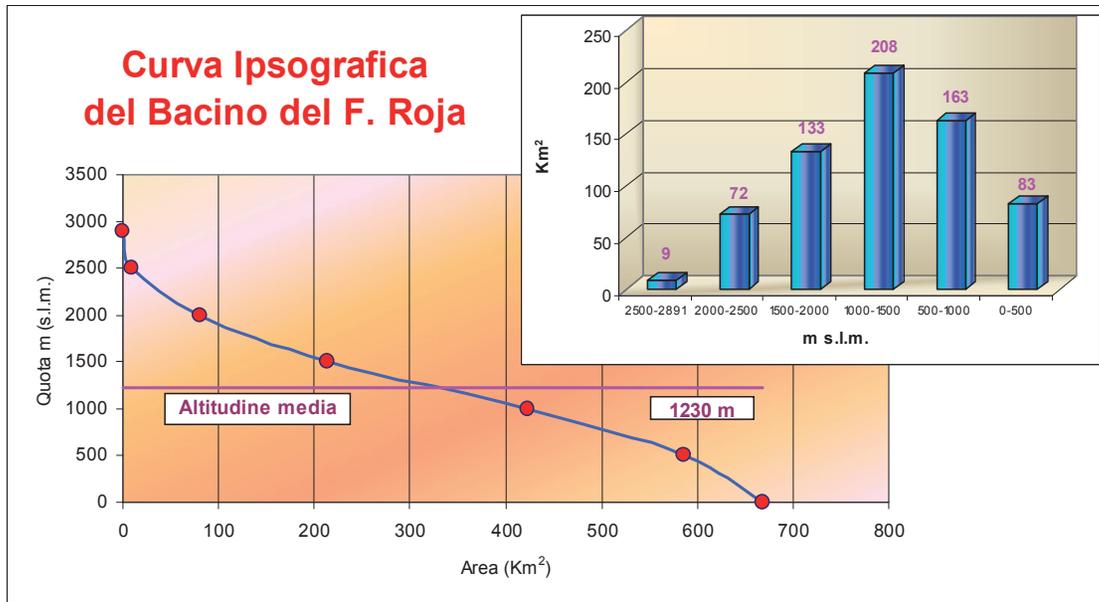


Figura12 – Curva ipsografica rappresentativa della distribuzione areale dell’altimetria del Bacino del Fiume Roja (linea azzurra); quota media del bacino (linea magenta)

Figure 12 – Hypsographic curve representative of the areal distribution of the altimetry of the Roja basin (blue line); average altitude of the basin (magenta line)

6. Considerazioni conclusive

Le elaborazioni effettuate a livello di bacino idrografico consentono di pervenire ad una valutazione attendibile della potenzialità idrica superficiale e sotterranea del territorio in esame.

Il Progetto Interreg III Alcotra Italia/Francia (Euro-bassin) costituisce senz’altro un primo passo fondamentale nella direzione della tutela e conservazione delle risorse idriche superficiali e sotterranee di questo territorio. Sarebbe quindi necessario definire quanto prima un’efficace programmazione delle attività future volta a razionalizzare la raccolta e la gestione dei dati idroclimatici (Piogge, Temperature, Deflussi) con particolare riguardo alla prosecuzione del monitoraggio delle stazioni oggi esistenti, ma tenendo presente che la densità delle medesime può essere aumentata per migliorare le valutazioni sul territorio.

In particolare:

- Le stazioni idrometrografiche esistenti appaiono numericamente insufficienti per consentire dettagliate analisi sulle risorse idriche del bacino. Infatti, i dati che ci sono stati forniti riguardano, ad esclusione della stazione idrometrografica di Torri, misurazioni che risultano alterate da interventi antropici (S. Dalmat, Breil e Airole), inoltre la distribuzione delle stazioni non appare omogenea rispetto alle caratteristiche del Bacino. A nostro avviso, sarebbe necessaria l’aggiunta di almeno altre tre stazioni idrometrografiche: due poste a monte di ciascun invaso, rispettivamente di S. Dalmat e Breil, in modo da

poter valutare quantitativamente le modalità di prelievo e di rilascio delle centrali e quindi poterle correttamente considerare nei calcoli di bilancio; l’altra ubicata in prossimità della Foce del Roja e comunque a valle della confluenza con il Bevera, in modo da poter monitorare con maggior dettaglio, sia gli apporti di questo affluente, che i valori delle risorse idriche superficiali e sotterranee dell’intero bacino del Roja.

- La distribuzione delle stazioni termopluviometriche è disomogenea rispetto alla morfologia del Bacino. Dal grafico di figura 12, dove è possibile vedere la distribuzione areale delle fasce altimetriche caratterizzanti l’intero Bacino del fiume Roja, si osserva come circa 208 Km² siano caratterizzati da un’altitudine compresa tra i 1000 e i 1500 m s.l.m., circa 133 Km² abbiano un’altitudine tra i 1500 e 2000 m, circa 81 Km² ricadano oltre i 2000 m e solo circa 246 Km² appartengano a quote inferiori ai 1000 m. Se però si analizza la distribuzione attuale delle stazioni termo-pluviometriche, si osserva come la quasi totalità di esse ricada all’interno della fascia ≤ 1000 m s.l.m., solo una è ubicata tra i 1500 e 2000 m s.l.m., mentre le altre fasce altimetriche sono completamente prive di stazioni.

- A causa di questa disomogenea distribuzione si è ricorso all’utilizzo di ben sei stazioni fittizie, dato che quindi ben 330 Km² del Bacino (circa la metà, come si vede da Figura 12) sono coperti solamente da una stazione pluviometrica. Dato che la quota media del bacino è di circa 1230 m, ben si capisce come agisca tale carenza di

stazioni di misura a quote elevate sulle reali valutazioni degli afflussi meteorici, i quali costituiscono, notoriamente, l'input dei modelli usati per le valutazioni di tipo idrologico.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano vivamente la Provincia di Imperia

(capofila) ed in particolare il Dr. Ennio Rossi, la Regione Liguria, così come il BRGM ed EdF (Electricité de France) per la parte francese. La Regione Provence Alpes Côte d'Azur, il Département des Alpes Maritimes così come la Città di Mentone che hanno partecipato al finanziamento del progetto.

Bibliografia

- Barazzuoli P., Micheluccini M., Salleolini M. & Salvadori L., 1986 - Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale: 1) Applicazione del "Metodo Kennessey" al bacino del Torrente Farma (Province di Siena e Grosseto) e sua verifica con i calcoli di bilancio. *Boll. Soc. Geol. It.*, 105, 333-350.
- Barazzuoli P., Izzo S., Micheluccini M. & Salleolini M., 1987a - Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale: 2) La carta dei coefficienti di deflusso del bacino del F. Merse (Prov. di Siena e Grosseto). *Mem. Soc. Geol. It.*, 37, 207-213.
- Barazzuoli P., Izzo S., Micheluccini M. & Salleolini M. (1987b) - L'uso della carta dei coefficienti di deflusso nella gestione del territorio. *Atti del VI Congresso Nazionale O.N.G.*, Venezia, 25-27 settembre 1987, 375-382.
- Barazzuoli P., Izzo S., Menicori P., Micheluccini M. & Salleolini M., 1989 - A new practical aid to regional hydrogeologic planning: the runoff coefficient map. *Environmental Management*, 13(5), 613-622.
- Barazzuoli P., Izzo S., Menicori P., Micheluccini M. & Salleolini M., 1989 - L'uso della carta dei coefficienti di deflusso nella gestione del territorio. *Atti VI Congresso Nazionale O.N.G.*, 25-27 settembre 1987 Venezia, 375-382.
- Barazzuoli P. & Salleolini M. 1992 - Evaluation of surface water and groundwater resources in watershed planning: comparison between various estimation methods in Southern Tuscany. *Atti del 76° Congresso S.G.I.*, 21-23 settembre 1992 Firenze, *Mem. Soc. Geol. It.*
- Barazzuoli P., Pizzuto D., Rigati R. & Salleolini M., 1994 - Valutazione delle risorse idriche dell'alto bacino del F. Biferno (Molise): un esempio di utilizzo del deflusso su basi fisiografiche. *Boll. Soc. Geol. It.*, 113(3), 709-728.
- Barazzuoli P., Izzo S., Menicori P., Rigati R. & Salleolini M., 1995 - Uso del deflusso calcolato su basi fisiografiche nella stima delle risorse idriche dell'alto bacino del F. Sinni (Basilicata). *Boll. Soc. Geol. It.*, 115(2), 287-305.
- Barazzuoli P., Renai I., Rigati R. & Salleolini M., 2000 - Hydrologic and hydrogeologic study of the River Taquari watershed (Mato Grosso do Sul, Brazil). Poster presentato al XXXI Congresso Geologico Internazionale, Rio de Janeiro, 6-17 agosto 2000
- De Martonne E.M., 1926 - Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. *La Météorologie*, 2, 449-458.
- Tonini D., 1983 - Elementi di idrografia ed idrologia. Voll. I e II, Ed. Libreria Cortina, Padova.
- Thornthwaite C.W. & Mather J.R., 1957 - Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Centerton, N. J.