Determinazione dell' infiltrazione efficace alla scala di bacino finalizzata alla individuazione delle aree a diversa disponibilità di risorse idriche sotterranee

M. Brugioni, F. Consumi, B. Mazzanti, G. Menduni, G. Montini

Introduzione

Nell'ambito della predisposizione del Piano di Bacino del fiume Arno – Stralcio Bilancio Idrico, l'Autorità di Bacino ha messo a punto una procedura per la determinazione dell'infiltrazione efficace a scala regionale finalizzata a stimare il contributo del regime pluviometrico al bilancio idrico delle acque sotterranee. I fattori che concorrono a determinare l'infiltrazione efficace sono molteplici, come ad esempio la distribuzione spaziale e temporale delle precipitazioni, i parametri morfometrici del rilievo, la distribuzione delle temperature al suolo, le caratteristiche idrogeologiche e startigrafiche delle formazioni affioranti, l' uso del suolo, etc. Le dinamiche che si stabiliscono tra tali parametri sono caratterizzate da comportamenti sensibilmente non lineari; la loro modellazione richiede inevitabilmente un grado di approssimazione più o meno elevato per una realistica ricostruzione degli stati e dei valori su una serie temporale assegnata.

La procedura utilizzata nel presente lavoro, proprio perché finalizzata ad applicazioni alla scala del bacino idrografico, è stata sviluppata in modo da considerare solamente alcuni termini fondamentali per la stima dell'infiltrazione efficace, per poi applicare una procedura a sovrapposizione di layers in ambiente GIS utilizzando algoritmi in parte presi dalla bibliografia esistente e in parte modificati per meglio adattarli alla realtà del territorio studiato. Il risultato finale è stato quindi tarato e validato su alcuni sottobacini ritenuti significativi sia per gli aspetti geologici e morfometrici considerati che per la consistenza delle serie storiche dei dati idrologici disponibili.

Infine, con lo scopo di approfondire la fase di validazione e taratura, viene presentata una strategia di confronto con le informazioni ricavabili da tecniche di monitoraggio da telerilevamento, basata sull'utilizzo di una estesa serie storica di immagini provenienti da piattaforma satellitare.

Parametri considerati per la stima dell'infiltrazione efficace

Tra i vari fattori che concorrono alla stima dell'infiltrazione efficace sono stati considerati il regime delle precipitazioni, i caratteri geologici delle formazioni affioranti nel bacino, la pendenza dei versanti e l'uso del suolo.

Precipitazioni

In considerazione degli scenari condivisi in merito alle questioni relative alla dinamica del clima, si è ritenuto di basare le varie elaborazioni sui dati idroclimatici (precipitazione media annua ed evapotrasporazione reale) relativi all'arco temporale 1993-2006. In particolare, sono state

considerate 87 stazioni pluviometriche per effettuare la spazializzazione del dato puntuale di precipitazione su tutto il territorio del bacino (Figura 1).

Figura 1 – Distribuzione delle precipitazioni medie annue nel periodo 1993-2006.

Come possiamo osservare, la distribuzione delle precipitazioni medie annue risulta molto influenzata dalla componente orografica. Quest'ultima infatti determina un regime pluviometrico più elevato in corrispondenza della dorsale appenninica e, conseguentemente, una forte differenziazione degli afflussi sui sottobacini corrispondenti agli affluenti dell'Arno che si trovano in destra idraulica rispetto a quelli di sinistra.

Geologia

Per analizzare le caratteristiche geologiche delle formazioni affioranti è stata utilizzata la carta geologica del Servizio Geologico d'Italia in scala 1:100.000. Per semplicità di rappresentazione cartografica, in Figura 2 viene riportata la carta utilizzata raggruppando le varie formazioni geologiche in otto classi litotecniche.

Figura 2 – Distribuzione delle principali classi litotecniche affioranti nel bacino

Nel bacino dell'Arno il litotipo dominante è quello delle rocce arenacee, che affiorano estesamente su tutta la dorsale appenninica, caratterizzate da permeabilità relativa media e ricoprenti quasi il 50% del bacino, con conseguente infiltrazione efficace non elevata. Solo nelle formazioni in cui prevalgono le rocce carbonatiche carsificate l'infiltrazione efficace raggiunge valori elevati, anche se queste formazioni sono poco diffuse nel bacino dell'Arno. Nei sedimenti pliocenici l'infiltrazione efficace è da considerarsi trascurabile salvo nei litotipi a carattere prevalentemente sabbioso. I terreni più permeabili sono quelli delle pianure alluvionali anche se, in molte aree, le ghiaie e le sabbie acquifere sono coperte da alcuni metri di limo argilloso a bassa permeabilità.

Per le successive elaborazioni riguardanti la stima dell'infiltrazione efficace, ad ogni formazione geologica è stato attribuito un valore dell'Indice di deflusso di base (BFI), parametro adimensionale che esprime il contributo, in termini di portata, che la formazione geologica in esame fa infiltrare nel sottosuolo e che, dopo una circolazione lenta in confronto ai tempi del deflusso superficiale, giunge al reticolo. Per eventuali approfondimenti riguardanti la procedura utilizzata per la stima del BFI, oltre a vari contributi della letteratura (Manciola, 1991; Lvovitch, 1972), si rimanda al Piano di Bacino del fiume Arno – Stralcio Bilancio Idrico (AdBArno, 2008).

Pendenza dei versanti

La pendenza dei versanti è un fattore molto importante nella stima dell'infiltrazione efficace in quanto un suo aumento favorisce il ruscellamento superficiale. La carta delle pendenze è stata ottenuta tramite elaborazione GIS del modello digitale del terreno a maglie quadrate con lato di 10 metri. Come mostrato in Figura 3, le pendenze sono state infine suddivise in 4 classi in funzione della loro influenza sull'infiltrazione.

Figura 3 – Distribuzione delle classi di pendenza dei versanti considerate

Figura 4 – Distribuzione delle classi di uso del suolo considerate

Uso del suolo

L'uso del suolo nel bacino è stato determinato attraverso la carta di copertura del territorio Corine land cover. Questo strato informativo individua 44 classi di uso del suolo. Per i nostri fini si è ritenuto opportuno semplificare tale schematizzazione, giungendo alla definizione di quattro classi

ritenute in un certo senso significative per l'infiltrazione nel sottosuolo. Tale metodologia si richiama ai tipi di approccio in materia sviluppati da Kennessey (1930) e aggiornati dai lavori di Barazzuoli et al. (1986). Come mostrato in Figura 4, il risultato è una carta di uso del suolo che suddivide il bacino dell'Arno in aree urbanizzate e roccia nuda, pascoli, terra coltivata e boscata, bosco d'alto fusto.

Applicazione a scala di bacino

Al fine di determinare l'infiltrazione efficace alla scala di bacino si è innanzi tutto proceduto alla stima della precipitazione efficace, ovvero della differenza tra afflussi meteorici (P) ed evapotraspirazione reale (ET). A tal fine è stata considerata la distribuzione della media annua, valutata sul periodo 1993-2006, di P ed ET, calcolata tramite formule parzialmente empiriche basate su dati medi di temperatura dell'aria, scegliendo quelle che meglio si adattavano alle caratteristiche climatiche e fisiografiche del bacino dell'Arno.

In particolare, il metodo utilizzato per la stima di ET è quello proposto da Turc (1954), così come modificato da Santoro (1970), espresso dalla seguente relazione:

$$ET = P/\sqrt{0.9 + (P/L)^2}$$

con $L = 586 - 10T_a + 0.005T_a^3$, P = altezza di precipitazione media annua in mm e T_a = temperatura media annua in gradi Celsius.

Figura 5 – Distribuzione dell'evapotraspirazione media annua

In Figura 5 è riportato il risultato ottenuto sul bacino; si osservano valori medi contenuti tra 750 e 445 mm, quindi con una sensibile variabilità spaziale, passando da valori minimi rilevabili nella zona della Valdichiana, soprattutto nella sua porzione più meridionale, a valori massimi che interessano la zona settentrionale, comprensiva sia della zona appenninica che della zona pianeggiante del basso Valdarno, compresa la zona costiera.

Effettuando la differenza tra P ed ET si è quindi ottenuta la precipitazione efficace, termine alla base della stima del quantitativo idrico che effettivamente si rende disponibile per il ravvenamento delle falde acquifere. Per tale stima è stato considerato il deflusso idrico globale del bacino, il cosiddetto water surplus (Ws), coincidente con la precipitazione efficace, tramite l'equazione del bilancio:

$$Ws = P - ET = D + Ie$$

dove D è il deflusso e Ie l'infiltrazione efficace. Il valore di Ie si ottiene quindi attraverso i cosiddetti Coefficienti di Infiltrazione Potenziale (CIP; Celico, 1988), ovvero valori percentuali di Ws ricavati in genere da osservazioni su bacini campione, basate sulla permeabilità delle litologie affioranti all'interno dell'area considerata.

Come si può osservare dall'analisi dei valori di CIP riportati in Celico (1988), per alcuni complessi idrogeologici la fascia di variazione risulta molto ampia. Tale metodo dà risultati ovviamente più consistenti per le aree su cui sono stati calibrati sul campo i coefficienti, mentre può portare ad errori anche notevoli se applicati in zone diverse.

Dato che l'infiltrazione efficace, oltre che dalle caratteristiche geologiche, è influenzata anche dalla pendenza del terreno e dall'uso del suolo, come già precedentemente evidenziato, si è ritenuto di integrare la sua stima con un metodo che tenesse conto anche di tali aspetti. Di conseguenza, per la stima dei coefficienti da attribuire a uso del suolo, pendenza e geologia, si è proceduto mediante un'analisi di tipo quali-quantitativo e una successiva validazione mediante confronto statistico con i valori del deflusso di base – indice ritenuto direttamente correlabile ai valori di infiltrazione efficace. Le stime di tali valori derivano dalle serie storiche delle portate registrate alle stazioni idrometriche.

In sintesi l'infiltrazione efficace nel bacino dell'Arno è stata determinata con l'equazione:

$$Ieff = P\ eff \times CIPg\ (\%) \times CIPps\ (\%)$$

assegnando ad ogni singolo elemento cartografico un coefficiente di tipo geologico (CIPg) derivato dalla metodologia di Celico (1988) modificata, e un coefficiente che tiene conto sia della pendenza che dell'uso del suolo (CIPps). La procedura complessiva utilizzata per la stima dell'infiltrazione efficace è riportata in Figura 6.

Per la stima preliminare dei range di variazione dei valori di CIPg ci si è avvalsi degli indici di deflusso di base (BFI) visti precedentemente e opportunamente rielaborati, seguendo la metodologia riportata in Figura 6. In tal modo sono stati fissati i valori estremi (massima e minima capacità di infiltrazione nel bacino) corrispondenti ad ogni formazione geologica.

Per la stima del valore CIPps, i relativi tematismi sono stati incrociati tramite la matrice di contingenza riportata in Figura 6, dove vengono individuate quattro classi di qualità (da E - elevata a B - bassa) che hanno lo scopo di fornire una stima dell'influenza dei parametri considerati sulla

capacità di infiltrazione. Alla classe corrispondente è stato quindi attribuito un intervallo percentuale di possibili valori.

Figura 6 – procedura utilizzata per la stima dell'infiltrazione efficace

La taratura finale dei due coefficienti CIPg e CIPps è stata svolta in alcuni sottobacini che, oltre ad essere significativi per aspetti geologici e morfometrici, presentano stazioni di controllo delle portate con serie storiche complete ed affidabili (Bisenzio, Pesa, Era e Casentino). La taratura si basa sul confronto del deflusso di base naturale (ovvero, esente dai prelievi), derivato dai dati registrati alle stazioni, con il valore di infiltrazione efficace ricavato dalle elaborazioni svolte. Il deflusso di base naturale è stato statisticamente ricavato per lo stesso ordine di tempo su cui è stata eseguita l'elaborazione dei dati (1993/2006), seguendo il metodo delle portate mensili caratteristiche, partendo da valori misurati alla stazione di chiusura del bacino sotteso, secondo la seguente espressione: Db naturale = Qmin giornaliera di ogni mese (1993/2006) + Q dissipata da pozzi e derivazioni.

Per quanto riguarda i coefficienti CIPg, ad ognuna delle formazioni geologiche, sulla base dell'intervallo di valori preliminarmente attribuito, e ipotizzando una variazione di tipo lineare, si è attribuito per approssimazioni successive il valore che determina il minimo scarto tra stima dell'infiltrazione efficace e deflusso di base medio annuo alla sezione di chiusura (funzione obiettivo). Contestualmente, si è proceduto alla ottimizzazione della stima dei valori di CIPps, all'interno dei range di variazione fissati dalla matrice di contingenza, considerando la stessa funzione obiettivo. Il processo di taratura ha così consentito, per approssimazioni successive, di

arrivare all'obiettivo fissato (contenimento dello scarto tra i valori stimati dell'infiltrazione efficace e del deflusso di base all'interno del 15%).

Figura 7 – distribuzione dei valori di infiltrazione efficace nel bacino dell'Arno.

Una volta effettuata la calibrazione dei due coefficienti CIPg e CIPps si è quindi proceduto alla elaborazione della cartografia dell'infiltrazione efficace riportata in Figura 7, ottenuta moltiplicando i valori di pioggia efficace per i coefficienti di infiltrazione legati alla geologia e alla pendenza - uso del suolo.

Integrazione e validazione del modello attraverso l'uso di dati satellitari

Nella metodologia appena descritta, i processi che determinano l'infiltrazione efficace sono modellati con schematizzazioni più o meno elaborate, basate su alcune assunzioni di carattere euristico. Consci del fatto che uno degli aspetti più delicati e di maggiore incertezza, vista la complessità dei fenomeni in gioco e il carattere turbolento degli scambi di energia e di massa tra suolo e atmosfera, è quello della stima dell'evapotraspirazione reale, si è ritenuto significativo integrare l'applicazione modellistica con l'uso di informazioni derivate dalla elaborazione di immagini telerilevate, provenienti da piattaforma satellitare. Si fa riferimento, in particolare modo, alla fruizione combinata di dati spaziali relativi alle stime di indici di vegetazione (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index; Fr, Fractional vegetation cover) e temperatura radiometrica superficiale (LST, Land Surface Temperature), che possono fornire informazioni quantitative sul contenuto di umidità del suolo, e di conseguenza, considerando i valori distribuiti degli afflussi, su le quantità coinvolte nel processo di evapotraspirazione. L'idea che sottende questa fase è quella di utilizzare questo dato, integrato sulla più ampia serie storica possibile, per

sostituire con una stima indiretta il valore medio annuo stimato su base modellistica con la formula di Turc; o, in senso inverso, come base per un raffinamento della taratura del metodo.
Si fa particolare riferimento ai dati resi pubblicamente fruibili dalla NASA e provenienti dal sensore MODIS, montato sui satelliti AQUA e TERRA, a scansione temporale giornaliera. L'idea di base della metodologia di stima di ET è che la temperatura radiometrica della superficie (LST) è sensibilmente dipendente dal contenuto d'acqua del suolo. Tra le diverse applicazioni riscontrabili in letteratura, si cita in particolare quella nota come "metodo del triangolo" (Carlson, 2007), basata sulla restituzione grafica delle coppie di punti (per ogni pixel delle immagini) delle stime della temperatura radiometrica LST e dell'NDVI. Se la depurazione della copertura nuvolosa consente di ottenere un campione sufficientemente numeroso, si osserva l'esistenza di relazioni lineari che interpolano bene l'andamento delle temperature radiometriche massime e minime riferite a ciascun valore di NDVI (rette chiamate rispettivamente "warm edge" e "cold edge"; vedere figura 8) e che l'intervallo di temperature corrispondenti a ciascuna classe di valori di NDVI (o della frazione vegetata) diventa via via più stretto, procedendo verso ambiti più vegetati. L'andamento dell'inviluppo assume allora un andamento trapezoidale o addirittura triangolare, da cui il nome del metodo. L'autore pone l'ipotesi (forte) che la temperatura radiometrica della vegetazione non vari nello spazio. Ne deriva che la LST, per un assegnato valore di NDVI, dipende solo dall'umidità del suolo. Così, una volta fissato l'NDVI, ai pixel collocati sul cold edge corrisponde il massimo livello di umidità mentre quelli opposti, sul warm edge sono i più secchi. La forma del pattern triangolare, per ogni singola immagine, dipende dalle caratteristiche del territorio e del clima locale e non è riducibile ad un'unica geometria. L'ipotesi di conservazione dell'andamento geometrico dell'inviluppo osservato fornisce la condizione di chiusura per il modello e consente di mappare, proprio sul dominio triangolare, isoplete dell'umidità del suolo. Le linee ad eguale contenuto d'acqua sono linee che tendono al cold edge per suoli saturi e al warm edge per quelli secchi; il passaggio inverso da punti del grafico a pixel distribuiti sulla rappresentazione matriciale (raster) del territorio consente quindi una ricostruzione spaziale e temporale (i dati sono normalmente disponibili a cadenza quindicinale) della stima delle condizioni di umidità del suolo; quindi, attraverso il confronto con i valori affluiti come precipitazioni sulle stesse finestre temporali, una stima di ET – sempre come mappatura sull'intero bacino. Al presente, si è proceduto a collezionare una ampia serie storica (2000 – 2007) dei dati di interesse (immagini, o raster, comprendenti il territorio del bacino dell'Arno), a processare tali immagini (attraverso un procedimento di validazione e di controllo di qualità), e ad estrarre una consistente ed omogenea serie di mappe di indice di vegetazione, di temperatura al suolo, di afflussi meteorici; attualmente l'attività è concentrata proprio sulla derivazione delle mappe di stima dell'evapostraspirazione. Una prima applicazione del metodo del triangolo al caso del bacino dell'Arno (Figura 9) mostra una buona

aderenza all'andamento riportato in letteratura, e rappresenta una ragionevole base su cui sono stati impostati gli algoritmi per la derivazione delle mappe di evapotraspirazione.

Figura 8 - Pattern del "triangolo" così come proposto da Carlson (2007), costituito da coppie di punti delle misure di temperatura radiometrica vs. Fr per un insieme di pixel tratti da un'unica immagine satellitare. Sul dominio "triangolare" sono definite le isoplete dell'umidità del suolo

Figura 9 – Grafico dei valori di NDVI e di differenza tra temperatura dell'aria e temperatura al suolo (LST), stimati tramite l'utilizzo di immagini MODIS-AQUA, relativamente al giorno 21/09/2003, per il bacino dell'Arno. Ogni punto del grafico rappresenta un pixel di 1x1 kmq

Conclusioni

Il modello ha permesso una stima quantitativa dell'infiltrazione efficace su tutto il bacino, che, pur nei limiti di un approccio di tipo qualitativo e soggetta a una certa componente euristica, ha il vantaggio di fornire una schematizzazione omogenea e consistente di fattori difficilmente quantificabili in maniera deterministica alla scala di bacino. Attraverso il processo di taratura è stato possibile minimizzare la componente di tipo soggettivo, calibrando i valori dei parametri che portano alla stima dell'infiltrazione efficace sulla base di dati rilevati, misura di una sorta di grandezza "integrale" delle caratteristiche del bacino (ovvero, la portata alla sezione di chiusura, nella sua componente di deflusso profondo). Il tenere in conto, oltre alla geologia, anche dei fattori pendenza e uso del suolo, rappresenta un forte arricchimento delle informazioni contenute nell'indice stimato, soprattutto nell'ottica di perseguire una migliore rappresentazione della sua distribuzione spaziale all'interno di classi geologiche omogenee, e quindi della struttura della varianza della grandezza.

Alla scala di bacino è risultata una infiltrazione efficace media di 105,5 mm/anno, mentre la ripartizione delle classi di infiltrazione sul territorio viene mostrata nei grafici di Figura 10. Le classi più rappresentate sono quelle di medio - bassa infiltrazione, a testimonianza dei litotipi dominanti a medio bassa permeabilità.

Figura 10 – distribuzione spaziale dei valori di infiltrazione efficace e valori medi per i principali sottobacini

L'uso dei dati telerilevati per approfondire e migliorare la stima di una delle componenti fondamentali e più incerte della metodologia (l'evapotraspirazione) rappresenta un ulteriore elemento di rilevante interesse per diminuire la distorsione delle stime e per rafforzare la significatività della modellazione dei processi di infiltrazione alla scala di bacino, oltre che per rendere più efficace la rappresentazione della loro variabilità spaziale.

Bibliografia

AdBArno, 2008. Progetto Piano Stralcio "Bilancio Idrico". Adottato nella seduta del Comitato Istituzionale del 28 febbraio 2008 e pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 78 del 2 aprile 2008.

Barazzuoli P., Michelucci M, Salleolini M & Salvadori L., 1986. Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale: 1) applicazione del "metodo Kennessey" al bacino del Torrente Farma (Provv. di Siena e Grosseto) e sua verifica con i calcoli di bilancio. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 105: 333-350 pp.

Carlson T., 2007. An Overview of the "Triangle Method" for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery, *Sensors 2007*, 7: 1612-1629 pp.

Celico P., 1988. Prospezioni Idrogeologiche Vol. I e II. *Liguori Editore*, Napoli.

Kennessey B., 1930. Lefolyasi tènyezok ès retencick. *Vizugy*, Kuziemények.

Lvovitch, M.I., 1972. World water balance: general report. In IAHS/UNESCO/WMO Proc. Of Symposium on World Water Balance, Reading, 1970: 401-415 pp, IAHS, Wallingford.

Manciola P. & Casadei S., 1991. Low flow index and hydrogeological characteristics, *ASCE Proc. National Conf. on Hydraulic Engineering*, Nashville, TN, 930-936 pp.

Santoro M., 1970. Sulla applicabilità della formula di Turc per il calcolo dell'evapotraspirazione effettiva in Sicilia. *Atti I Conv. Intern. Acque Sott.*, I.A.H., Palermo.

Turc L., 1954. Calcul du bilan de l'eau: evaluation en function des precipitation et des temperatures. *IAHS Publ.* 37 : 88-200 pp.