

3. Il bilancio delle acque sotterranee e la valutazione della disponibilità idrica

Il bilancio degli acquiferi significativi

Nel Piano di Tutela delle Acque redatto dalla Regione Toscana sono ritenuti significativi, cioè importanti per caratteristiche, potenzialità e utilizzo, 17 acquiferi ubicati nelle aree di pianura del bacino dell'Arno. Il bilancio delle acque sotterranee è stato pertanto calcolato per tali acquiferi che, peraltro, contengono oltre l'80% del volume delle risorse sotterranee del bacino.

Il lavoro è articolato in fasi successive, tra loro interrelate, che partendo dal quadro conoscitivo idrogeologico, dai prelievi e dalla stima delle risorse idriche sotterranee, hanno portato alla definizione del bilancio per ciascuno degli acquiferi considerati ed alla loro successiva zonazione in aree a diversa disponibilità idrica.

Quadro idrogeologico di riferimento

Dalla cartografia dei Complessi Idrogeologici del bacino (Tav. 6) e in accordo a quanto contenuto nel Piano di Tutela della Regione Toscana, sono stati caratterizzati gli acquiferi ritenuti significativi ai fini del bilancio (Tav. A).

Di ciascun acquifero è stata fatta una ricostruzione tridimensionale dei caratteri geometrici, delle caratteristiche idrogeologiche e delle potenzialità. È stata poi predisposta una scheda informativa generale che contiene i dati e le informazioni disponibili, con particolare riferimento alle stratigrafie ed alle caratteristiche idrogeologiche e strutturali del corpo idrico corredata da cartografie tematiche che riportano lo spessore delle coperture, la profondità del tetto e del letto dell'acquifero dalla superficie, lo spessore, la distribuzione di trasmissività, le condizioni idrogeologiche al contorno, la piezometria e le sezioni idrostratigrafiche (ved. capitolo "Il Quadro Conoscitivo").

Analisi delle pressioni sulle acque sotterranee

Nella valutazione delle disponibilità idriche riveste importanza fondamentale la conoscenza della domanda per i diversi usi, indispensabile per la corretta formulazione del bilancio e per la pianificazione e gestione delle risorse idriche stesse, anche in considerazione che le acque sotterranee rappresentano una risorsa strategica, soprattutto per il consumo umano.

In passato la pressione sulle falde acquifere non era tale da porre all'attenzione del legislatore la necessità di una regolamentazione del settore. Il testo unico sulle acque pubbliche (R.D. 1775/1933) infatti escludeva dal demanio le acque sotterranee, prevedendo che di volta in volta alcune falde acquifere potessero essere poste, previo decreto ad hoc, sotto la tutela della pubblica amministrazione.

La legge 36/94 ha sancito la demanialità di tutte le acque superficiali e sotterranee, estendendo la disciplina tramite la quale il TU 1775/1933 regolava l'utilizzo delle acque superficiale anche alle acque sotterranee.

Il primo passo verso una razionalizzazione dell'utilizzo delle acque sotterranee è stato il quindi il censimento delle utenze, basato su autodenunce effettuate in forza del d.lgs. 275/1993. Spesso però la documentazione a corredo delle denunce ed anche quella relativa ai nuovi pozzi risulta incompleta, in particolare per quanto riguarda i volumi effettivamente emunti.

Per quanto riguarda la georeferenziazione dei pozzi, quasi tutte le amministrazioni hanno messo a punto dei database informatizzati con l'indicazione di ogni singola captazione e del loro uso, anche con differenze notevoli da una Provincia all'altra per le informazioni disponibili.

Per quanto sopra, al fine di poter utilizzare per la redazione del bilancio un quadro omogeneo ed esaustivo dei volumi annui estratti dal sottosuolo, si è ritenuto necessario elaborare i dati disponibili in funzione dell'uso e dell'area di riferimento.

Fonte dei dati

Si è proceduto alla verifica della consistenza degli archivi esistenti presso tutti gli enti dotati di un archivio dei pozzi; con particolare riferimento alle province e al SIRA (Sistema Informativo Regionale Ambientale della Regione Toscana).

Di fondamentale importanza inoltre è stata l'acquisizione dei dati resi disponibili dalle Autorità di Ambito Territoriali Ottimali e dai Gestori del Servizio Idrico Integrato relativamente ai prelievi ad uso acquedottistico.

Per controllo ed ulteriore integrazione è stata utilizzata anche la banca dati delle concessioni dell'Autorità di bacino del fiume Arno, predisposta e funzionale all'espressione del parere di competenza relativamente alle piccole e grandi concessioni idriche.

Dall'analisi e omogeneizzazione degli archivi di cui sopra è stato ricavato un unico strato informativo in cui i campi fondamentali, oltre la georeferenziazione delle singole captazioni, sono la tipologia di utilizzo e il prelievo medio annuo.

Gli usi

Per quanto riguarda il dato relativo all'uso del pozzo, si è proceduto ad un accorpamento di alcune tipologie per renderlo omogeneo ed utilizzabile nelle elaborazioni a livello di bacino. Le categorie individuate sono le seguenti:

A – pozzi ad uso idropotabile acquedottistico (dato di riferimento ATO e Gestori);

P – pozzi ad uso produttivo. In questa casistica sono compresi anche gli usi la cui entità è paragonabile all'uso industriale (ad esempio pozzi ad uso condizionamento);

I – pozzi ad uso irriguo (irriguo in senso stretto., irrigazione aree a verde, attrezzature sportive condominiale, ittico, zootecnico);

D - pozzi ad uso domestico, (igienico e irriguo), non determinato, consumo umano non acquedottistico;

S - pozzi ad uso servizi vari (antincendio, igienico, antiparassitario, lavaggio strade).

Lo strato informativo ottenuto contiene in totale **122143**, pozzi così suddivisi fra i vari usi:

Pozzi ad uso Acquedottistico	1528
Pozzi ad uso Produttivo	4312
Pozzi ad uso Irriguo	15784
Pozzi ad uso Domestico	96752
Pozzi ad uso Servizi	3767

Tabella 43 - Numero di pozzi per uso sull'intero bacino del Fiume Arno

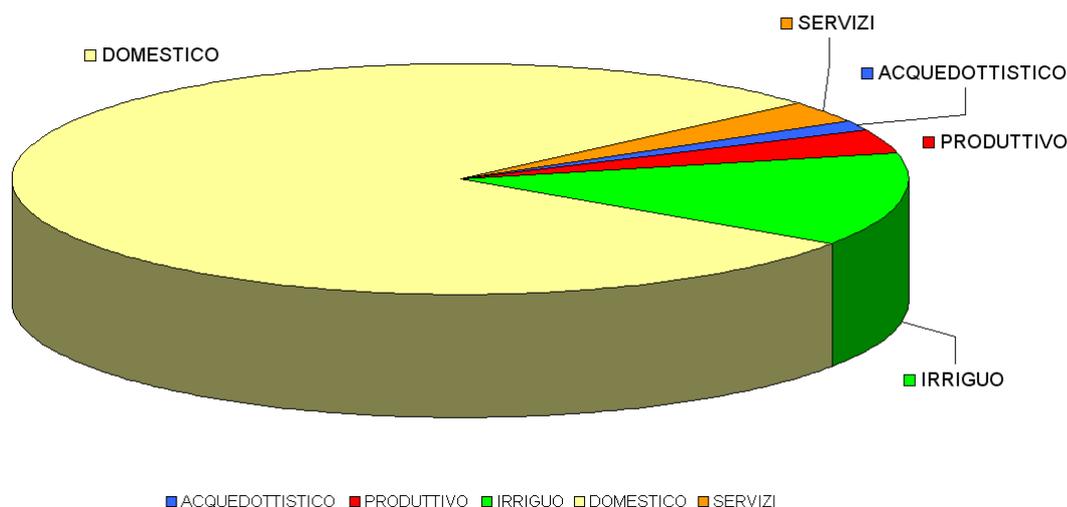


Figura 83 - Ripartizione del numero di pozzi in relazione all'uso nel bacino del Fiume Arno

Il volume annuo emunto

Non avendo a disposizione il volume annuo emunto derivato da misure dirette, sono state necessariamente fatte delle stime in funzione dell'uso dichiarato e dell'acquifero di riferimento, come di seguito dettagliato.

- **Pozzi ad uso acquedottistico:** sono quelli con dati più affidabili in quanto derivanti da misure dirette. Per questi è stato fornito il dato di volume medio annuo emunto da ogni singolo pozzo, con la relativa ubicazione.
- **Pozzi ad uso produttivo:** per tale tipologia gli archivi non sempre contengono i volumi annui estratti. Si è proceduto quindi all'individuazione di aree omogenee per tipologia merceologica, ad esempio i comprensori industriali del Tessile, del Cuoio e del Cartario, assegnando un volume medio annuo emunto da ogni pozzo sulla base delle domande di concessione del database dell'Autorità di bacino, confrontandoli sia con i dati misurati, ove disponibili, sia con i valori di ingresso agli impianti di depurazione a servizio dei comprensori industriali. Per le altre aree sono stati attribuiti valori in base alla tipologia del prelievo dalle informazioni contenute nel database concessioni dell'Autorità di bacino.
- **Pozzi ad uso agricolo:** la percentuale di pozzi denunciati varia molto da zona a zona; inoltre, data la stagionalità del prelievo, i dati denunciati sono scarsamente attendibili perché le portate richieste sono o valori medi sull'anno o, in molti casi, corrispondono alla portata specifica della pompa o a quella caratteristica del pozzo. Anche in questo caso sono state individuate aree omogenee dal punto di vista del prelievo irriguo ed è stato assegnato un volume annuo caratteristico della tipologia irrigua della zona. Ad esempio sono state distinte le aree del florovivaismo (Pistoia, Valdinievole) da quelle caratterizzate da un'agricoltura di tipo tradizionale, utilizzando sia le stime effettuate per i bilanci, sia basandosi sull'estensione delle aree irrigue e sui fabbisogni delle diverse colture. È stato inoltre contraddistinto il prelievo agricolo irriguo in senso stretto da quello di altro tipo (irrigazione aree a verde, attrezzature sportive, condominiale), in alcuni archivi unificato. In questo uso sono stati ricompresi gli usi ittico e zootecnico.

- **Pozzi ad uso domestico:** oltre che per l'uso igienico/potabile, l'acqua può essere utilizzata anche per l'innaffiamento di giardini ed orti, purché non a fini produttivi. Sono numericamente molto incidenti, soggetti ad una semplice autorizzazione e peraltro difficili da stimare. Ai fini del bilancio, questa tipologia, pur molto numerosa e distribuita, preleva dalle falde volumi modesti. Il valore medio di emungimento per tutto il bacino è stato stimato in 250 mc/anno per pozzo.
- **Pozzi ad uso servizi:** anche per questi, data la loro eterogeneità, è stata fatta una stima a scala di bacino, che ha portato ad assegnare un volume medio annuo per pozzo pari a 1420 mc.

Le volumetrie così ottenute sono state utilizzate per le successive elaborazioni a scala di bacino, in particolare per il bilancio e per l'individuazione di zone a diversa criticità di cui ai paragrafi successivi.

Il volume totale stimato è risultato di 311,77 Mmc/anno, ripartito per ogni uso come di seguito indicato.

Acquedottistico	131,69	Mmc/anno
Produttivo	71,91	Mmc/anno
Irriguo	72,31	Mmc/anno
Domestico	30,51	Mmc/anno
Servizi	5,35	Mmc/anno

Tabella 44 - Volume annuo emunto per uso sull'intero bacino del Fiume Arno

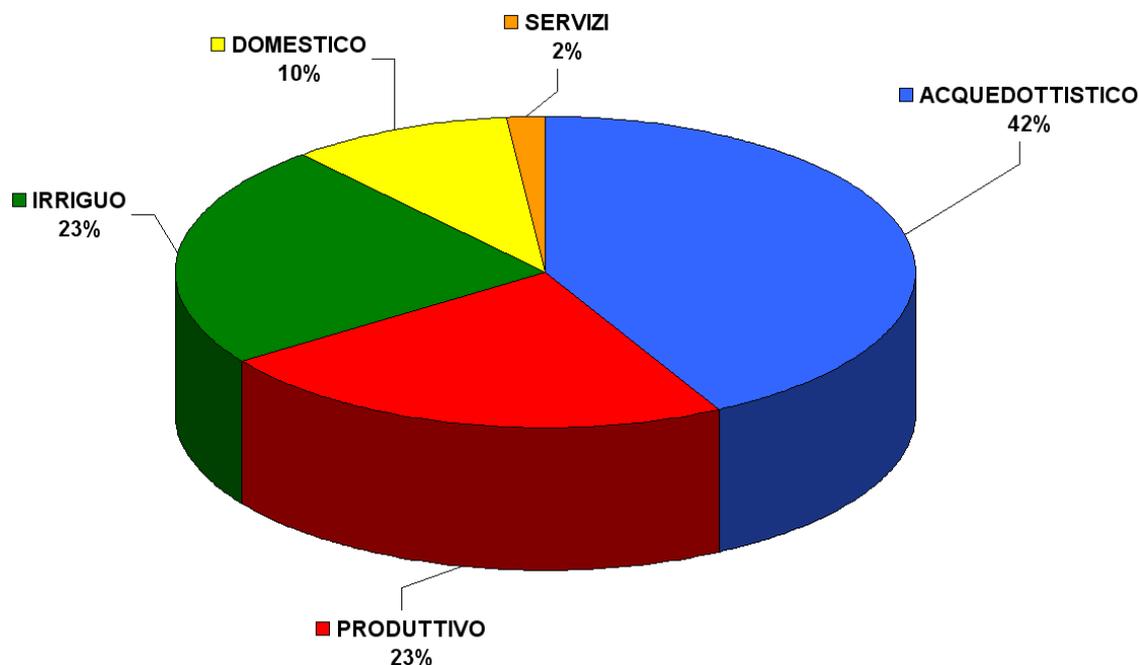


Figura 84 - Ripartizione del prelievo in relazione all'uso nel bacino del Fiume Arno

In particolare, ponendo l'attenzione sui soli acquiferi di pianura, nei quali è stato calcolato un bilancio idrogeologico di dettaglio, il volume annuo emunto risulta pari di 253,35 Mmc.

Acquedottistico	107,22	Mmc/anno
Produttivo	68,43	Mmc/anno
Irriguo	54,24	Mmc/anno
Domestico	19,31	Mmc/anno
Servizi	4,16	Mmc/anno

Tabella 45 - Volume annuo emunto per uso negli acquiferi di pianura

Tali volumi sono ripartiti fra i vari usi con percentuali sostanzialmente uguali a quelle calcolate per l'intero bacino.

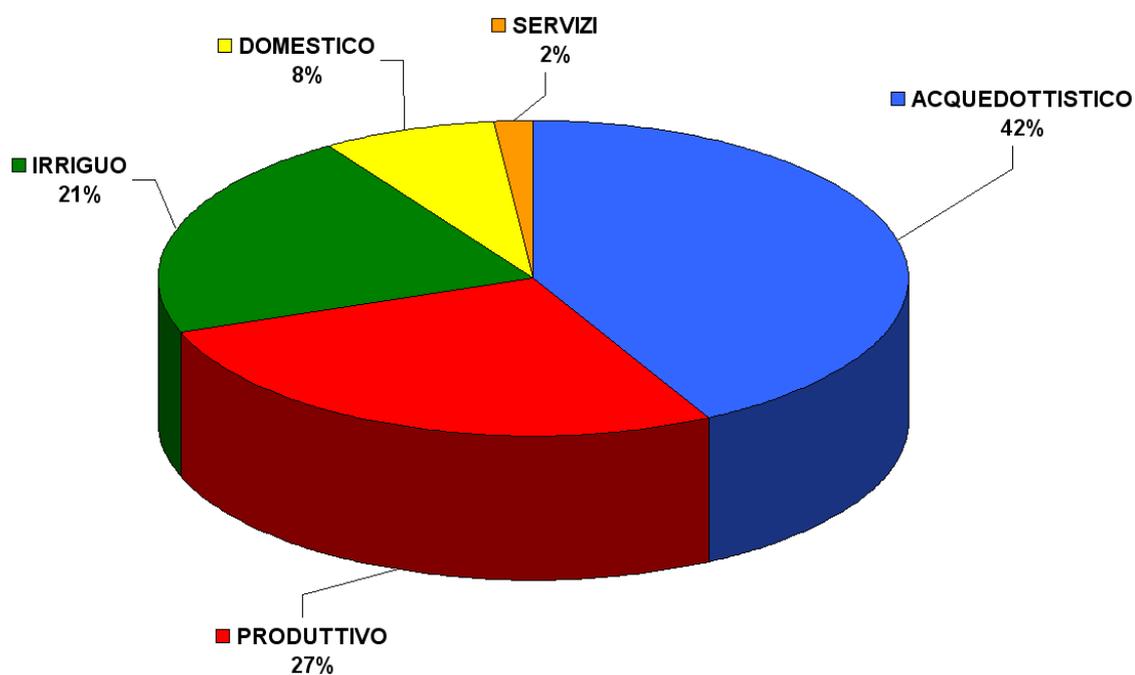


Figura 85 - Ripartizione del prelievo in relazione all'uso negli acquiferi di pianura

A conferma della *significatività* degli acquiferi individuati, si rileva come la maggior parte dei prelievi insiste sulle aree di fondovalle, sedi degli acquiferi più produttivi e dei maggiori insediamenti civili e produttivi.

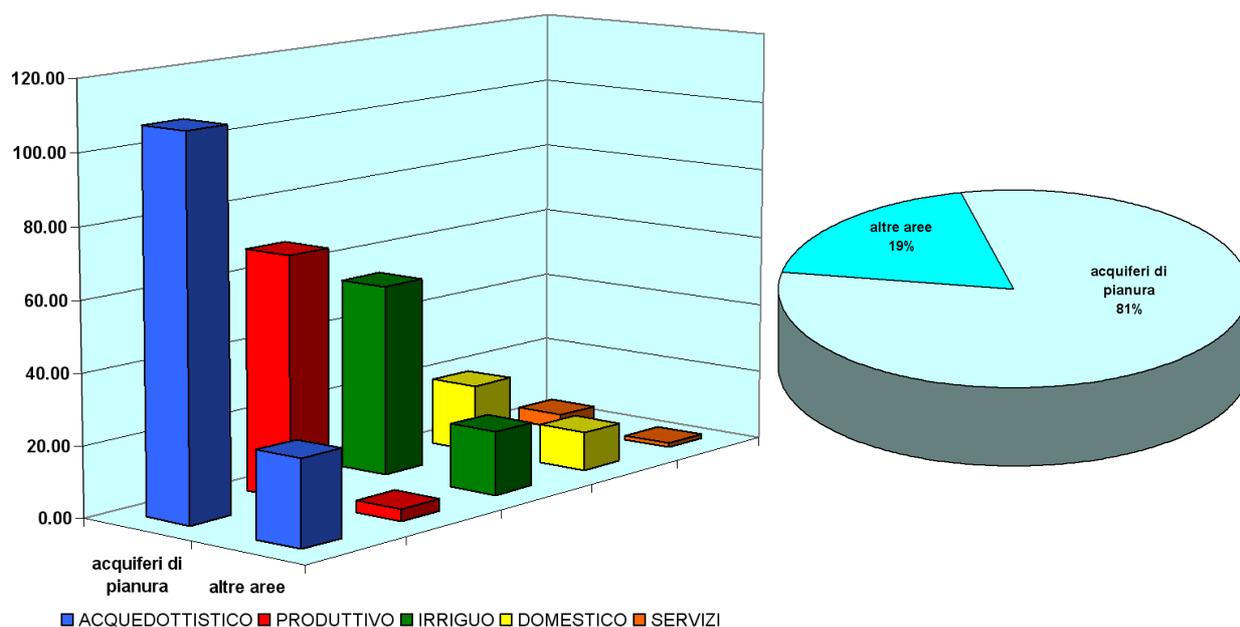


Figura 86 - Ripartizione del prelievo fra acquiferi di pianura e le altre aree del bacino in relazione all'uso

La densità pesata di prelievo

Al fine di evidenziare la distribuzione delle aree con maggiore concentrazione dei volumi idrici emunti, è stata effettuata una spazializzazione della densità dei pozzi, pesata in funzione del volume annuo assegnato. (Tav. 5)

Per la visualizzazione è stato creato un *raster* con celle di 50 m dove ad ogni cella è assegnato il valore corrispondente alla somma dei volumi annui emunti da pozzi ricadenti in un intorno circolare della cella stessa di raggio pari a 500 m (pari al valore stimato del raggio di influenza di un pozzo in acquiferi alluvionali).

L'algoritmo utilizzato è quello di Kernel (Silverman B.W., 1986) che, rispetto alla classica densità pesata di punti con intorno circolare, fornisce una superficie finale più dolce e meno influenzata dalla natura geometrica dell'intorno prescelto.

Il risultato ottenuto è stato suddiviso in quattro classi (1, 2, 3, 4) a densità crescente, come riportato nella seguente tabella:

Classe	Valore
1	< 10.000 mc/anno
2	10.000 – 100.000 mc/anno
3	100.000 – 1.000.000 mc/anno
4	> 1.000.000 mc/anno

Tabella 46 - Classi di densità di prelievo pesata

L'infiltrazione efficace del bacino del fiume Arno

Per la stima delle disponibilità idriche di acque sotterranee contenute negli acquiferi alluvionali significativi del bacino è stato messo a punto un modello per la stima dell'infiltrazione efficace, cioè la parte degli afflussi meteorici che si infiltra nel sottosuolo e va ad alimentare la falda, termine essenziale per la redazione del bilancio.

Numerosi sono i fattori che concorrono a determinare l'infiltrazione efficace: la distribuzione di precipitazione, la morfologia e la quota del rilievo, la distribuzione delle temperature al suolo, l'esposizione dei versanti e quindi i fattori fisici del territorio quali le caratteristiche geologiche delle formazioni affioranti, la loro permeabilità e il loro assetto, nonché l'uso del suolo.

In considerazione degli scenari condivisi in merito alle questioni relative alla dinamica del clima, si è ritenuto di basare le elaborazioni di bilancio, e quindi la determinazione della infiltrazione efficace, sui dati idroclimatici (precipitazione media annua ed evapotraspirazione reale) relativi all'arco temporale 1993 – 2006.

Precipitazione efficace

Il primo passo per la determinazione dell'infiltrazione efficace consiste nel calcolare la precipitazione efficace, vale a dire la differenza tra afflussi meteorici ed evapotraspirazione.

Il calcolo della precipitazione efficace è stato effettuato attraverso la stima della precipitazione media annua e dell'evapotraspirazione reale, secondo l'equazione

$$P_{eff} = P_{media} - E_t$$

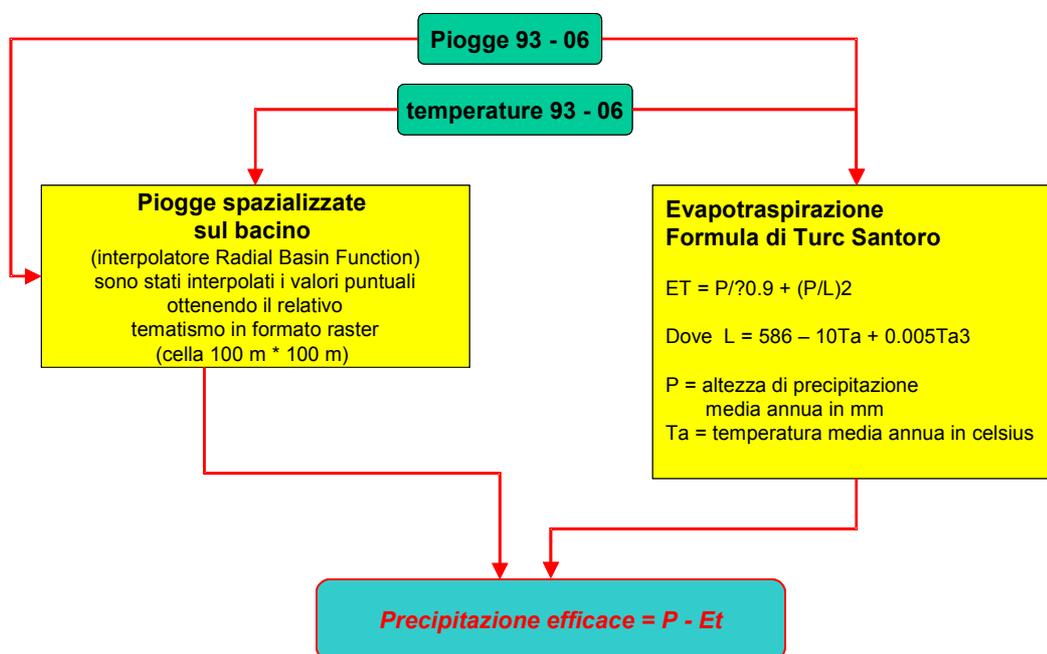


Figura 87 - schema della procedura per la determinazione della precipitazione efficace

Le precipitazioni

Le precipitazioni medie annue della serie storica 1993 – 2006 derivano dalla spazializzazione dei valori puntuali di precipitazione media rilevata in corrispondenza delle stazioni di misura (Tav. 1).

L'interpolazione dei dati riferiti alle 87 stazioni di misura è stata effettuata tramite l'algoritmo "Radial Basis Function" (RBF), interpolatore deterministico esatto che minimizza il raggio di curvatura locale della superficie di interpolazione finale, senza vincoli aggiuntivi sull'attribuzione dei valori incogniti. È stata effettuata un'interpolazione spaziale del dato puntuale, ottenendo la mappa della distribuzione della precipitazione in formato *raster* con celle quadrate di 100 metri di lato.

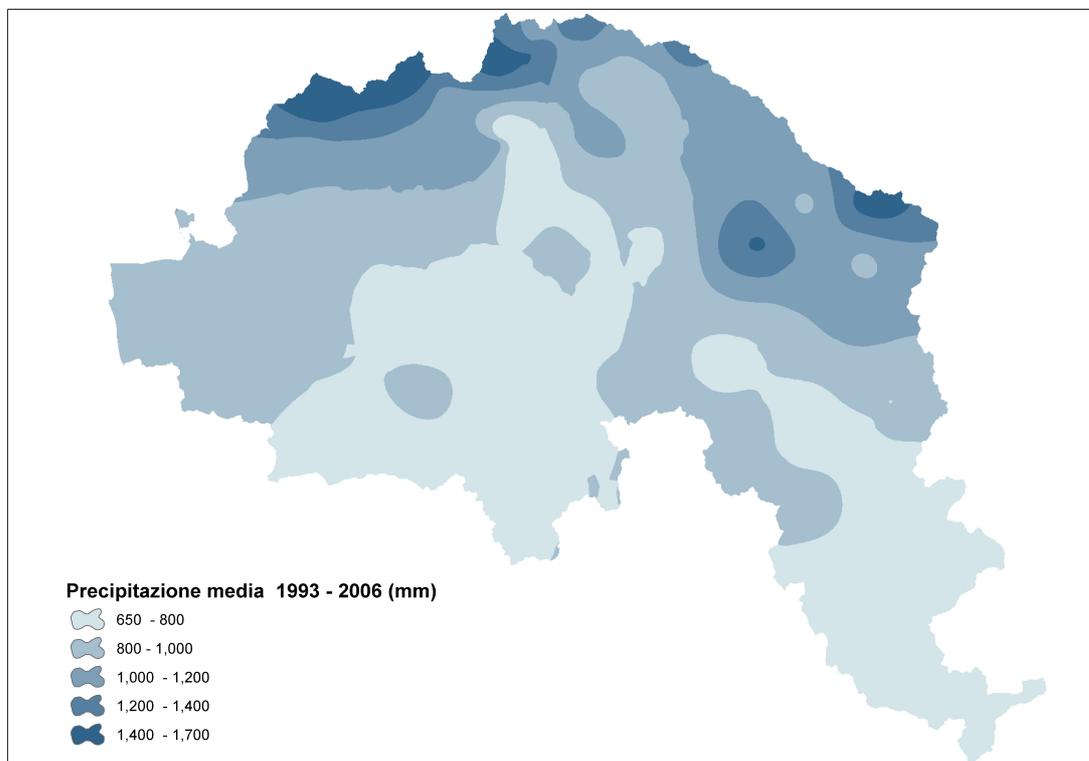


Figura 88 - Precipitazioni medie nel bacino relative al periodo 1993 - 2006

L'evapotraspirazione reale (ET)

Per il calcolo dell'ET sono state utilizzate formule parzialmente empiriche, che si basano su dati di temperatura dell'aria al suolo, tratte dalla nutrita letteratura in materia, scegliendo quelle più rispondenti alle caratteristiche climatiche e fisiografiche del bacino del fiume Arno.

Il calcolo dell'evapotraspirazione si avvale dei valori medi di temperatura rilevati nelle stazioni di misura del bacino, anche in questo caso interpolati con il metodo utilizzato per le precipitazioni, ottenendo la spazializzazione delle temperature medie annue nel periodo 1993 - 2006.

Il metodo indiretto per la stima di ET utilizzato è quello proposto da Turc, modificato come proposto 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

T_a temperatura media annua in gradi Celsius

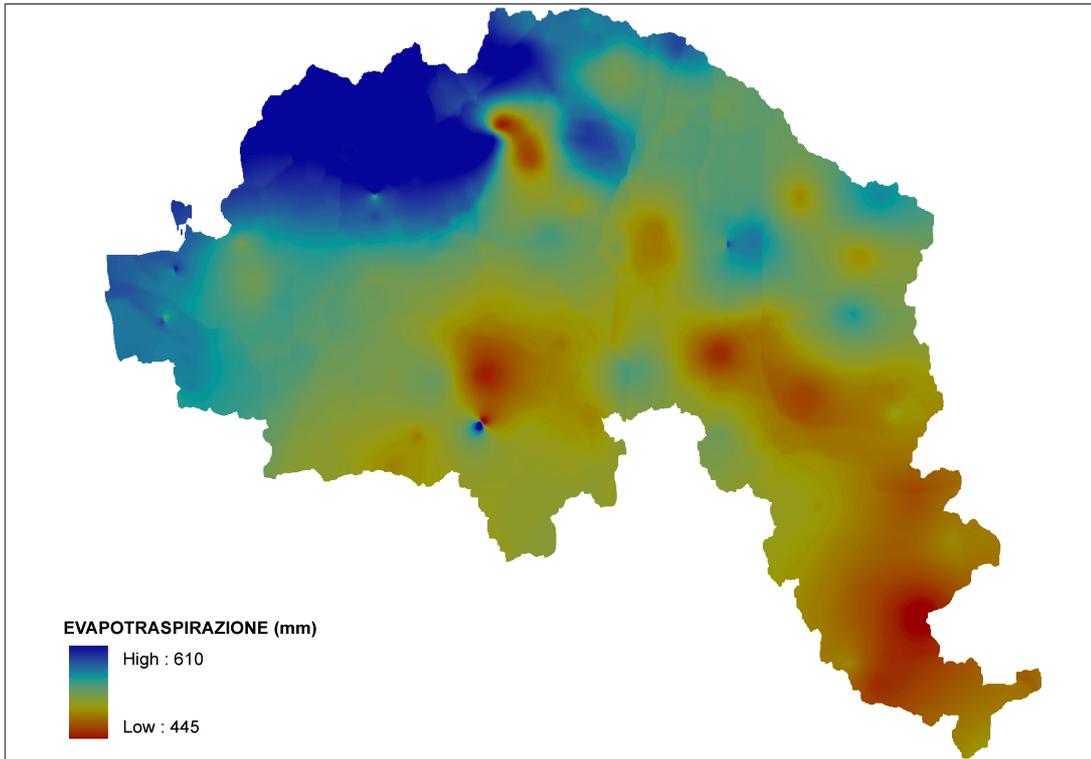


Figura 89 - Carta della evapotraspirazione

Seguendo la procedura sopra indicata, si è quindi giunti alla determinazione della *precipitazione efficace* come differenza tra i termini *P precipitazione* e *ET evapotraspirazione*.

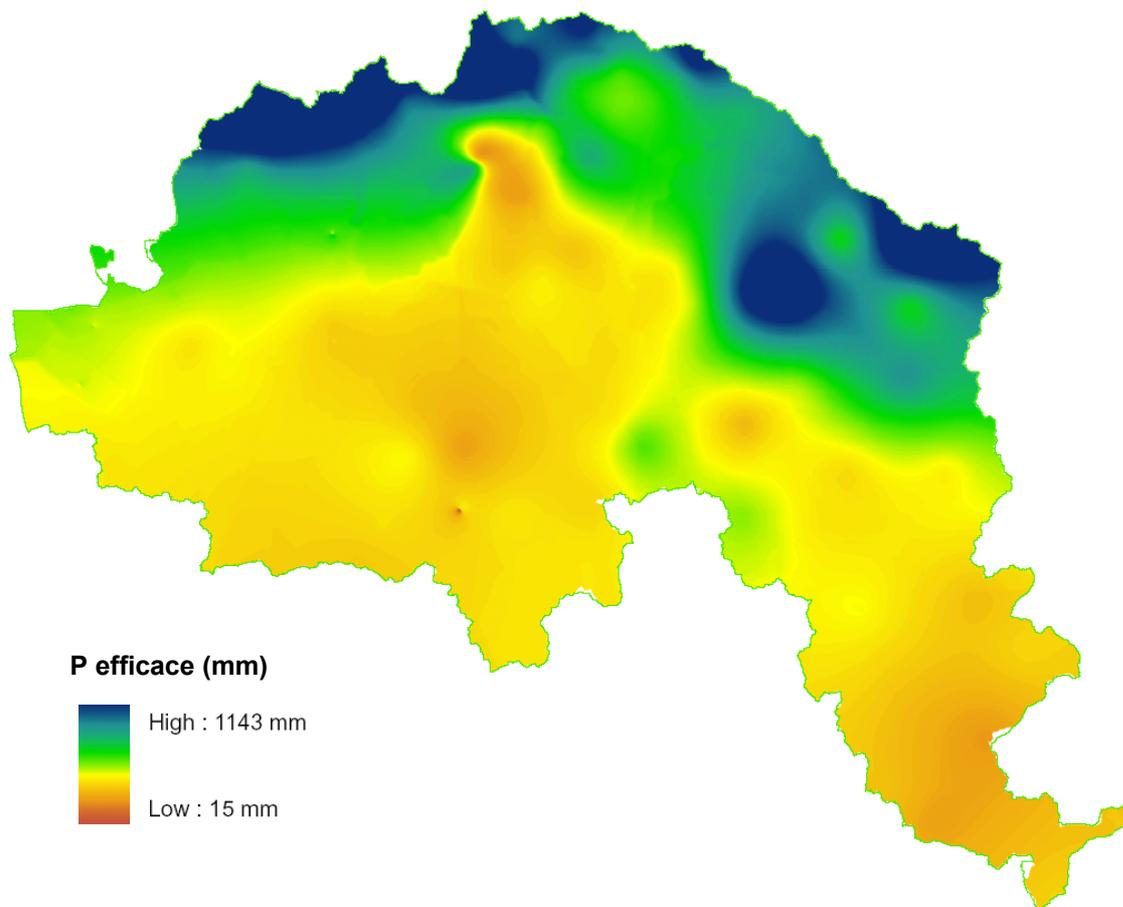


Figura 90 - Carta della precipitazione efficace

Infiltrazione efficace

Una volta valutata la *precipitazione efficace*, il passaggio successivo è il calcolo dell'*infiltrazione efficace* (le), cioè della quantità di acqua che effettivamente si rende disponibile per il ravvenamento delle falde acquifere.

Spesso l'*infiltrazione efficace* viene stimata in maniera indiretta, come differenza degli altri termini noti del bilancio idrico. Altro metodo è quello che, considerato il deflusso idrico globale di un dato bacino, il cosiddetto "*water surplus*", coincidente con la precipitazione efficace, tramite l'equazione del bilancio

$$Ws = P - Et = D + le$$

scompone il Ws in *deflusso* D e *infiltrazione efficace* le . Il valore di le si ottiene quindi attraverso i cosiddetti *coefficienti di infiltrazione potenziale* (C.I.P.) (Celico, 1988).

Si tratta di percentuali di Ws ricavati in genere da osservazioni su bacini campione, basate sulla permeabilità delle litologie affioranti all'interno dell'area considerata (es. calcari 90 – 100% di Ws).

$$C.I.P. = (le/Ws) 100$$

complessi idrogeologici	C.I.P. % Ws
Calcari	90 – 100
calcari dolomitici	70 – 90
Dolomie	50 – 70
calcari marnosi	30 – 50
Detriti grossolani	80 – 90
depositi alluvionali	80 – 100
depositi argilloso marnoso arenaci	5 – 25
Lave	90 – 100
depositi piroclastici	50 – 70
piroclastiti e lave	70 – 90
Rocce intrusive	15 – 35
Rocce metamorfiche	5 – 20
sabbie	80 – 90
sabbie argillose	30 – 50

Tabella 47 - Fasce di variazione dei C.I.P. in alcuni complessi idrogeologici (Celico, 1988)

Come si può notare dai valori riportati in tabella, per alcuni complessi idrogeologici la fascia di variazione è molto ampia. Tale metodo dà buoni risultati per le aree su cui sono stati calibrati sul campo i coefficienti, mentre può portare ad errori anche notevoli se applicati in zone diverse. Bisogna inoltre considerare che, oltre alle caratteristiche geologiche, l'infiltrazione efficace dipende anche dalla pendenza del terreno e dall'uso del suolo.

Per la stima dell'infiltrazione efficace nel bacino dell'Arno si è pertanto optato per un metodo che tenesse conto sia degli aspetti geologici che della pendenza e dell'uso del suolo. Per la stima dei coefficienti da attribuire a ciascun aspetto, si è proceduto mediante analisi di tipo quali-quantitativo e successiva validazione mediante confronto statistico con le serie di valori registrate alle stazioni idrometriche.

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

$$I_{eff} = P_{eff} \times CIPg \% \times C_{pend/suolo} \%$$

assegnando ad ogni singolo elemento del *raster*, di maglia 100 m per 100 m, un coefficiente di tipo "geologico" derivato dalla metodologia di Celico (1988) modificata, e un coefficiente che tiene conto della pendenza e dell'uso del suolo.

Coefficiente di infiltrazione dovuto alla geologia

Per la determinazione della $Q_{7,2}$ di ogni corso d'acqua del reticolo del bacino idrografico, è stato realizzato un modello di calcolo (vedi Capitolo successivo "Acque Superficiali") che, partendo dalle serie di dati registrati alle stazioni idrometriche, ricostruisce la curva di durata delle portate di ciascun tratto del reticolo. Tale metodo regionalizza il contributo alle stazioni di misura individuando per ogni formazione

geologica affiorante l'Indice di deflusso di base (BFI), parametro adimensionale dato dalla percentuale del rapporto tra deflusso di base e deflusso totale. Esso è definibile come il contributo, in termini di portata, che la formazione fa infiltrare nel sottosuolo e che, dopo una circolazione lenta in confronto ai tempi del deflusso superficiale, giunge al reticolo. In tal senso il deflusso di base è il contributo che sostiene le portate in assenza di precipitazioni ed in particolare nel periodo di magra.

Il coefficiente è stato calcolato con il metodo di Lvovitch (1972), basato sulla minima media mobile su 5 giorni del valore di portata media giornaliera. Il metodo è stato utilizzato, con modifiche, nel processo di calcolo e regionalizzazione del BFI.

In considerazione di quanto sopra, per l'individuazione dei coefficienti di tipo geologico per il calcolo dell'infiltrazione efficace, ci è sembrato corretto avvalersi degli indici di deflusso di base, opportunamente rielaborati.

Una volta fissati i valori estremi (massima e minima capacità di infiltrazione nel bacino), ad ogni formazione geologica è stato attribuito il coefficiente in maniera proporzionale al suo indice di deflusso di base, secondo la seguente legge di regressione lineare.

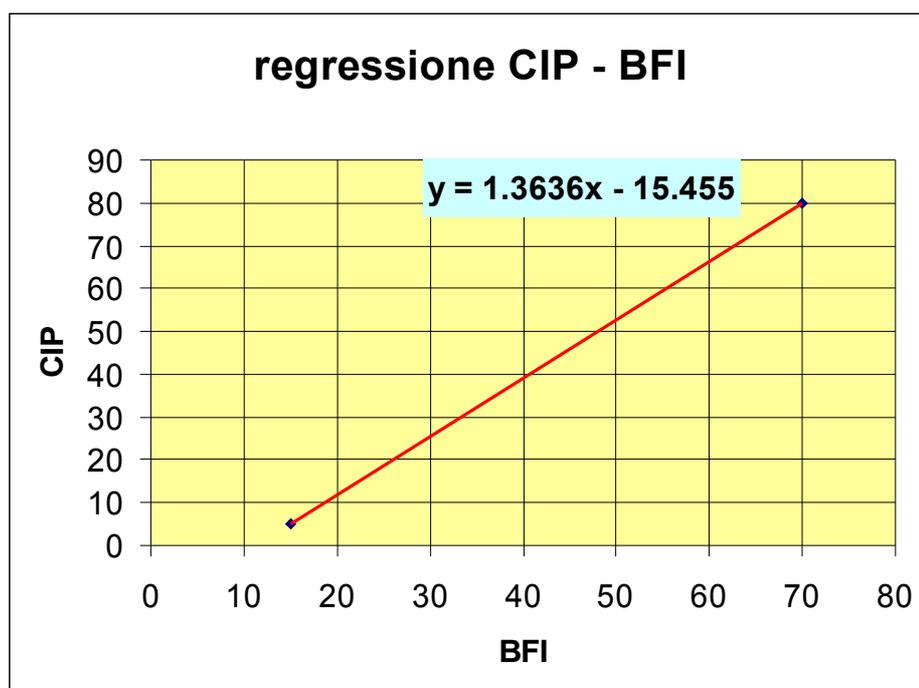


Figura 91 - Linea di regressione tra coefficiente di infiltrazione dovuto alla geologia e indice di deflusso di base

Ad ognuna delle formazioni geologiche è stato attribuito un intervallo di valori del coefficiente di infiltrazione che rispecchia la variabilità dell'indice di deflusso di base e l'appartenenza alla classe di propensione all'infiltrazione. Il valore finale è stato quindi assegnato per iterazioni successive, all'interno di tale intervallo, attraverso il processo di taratura.

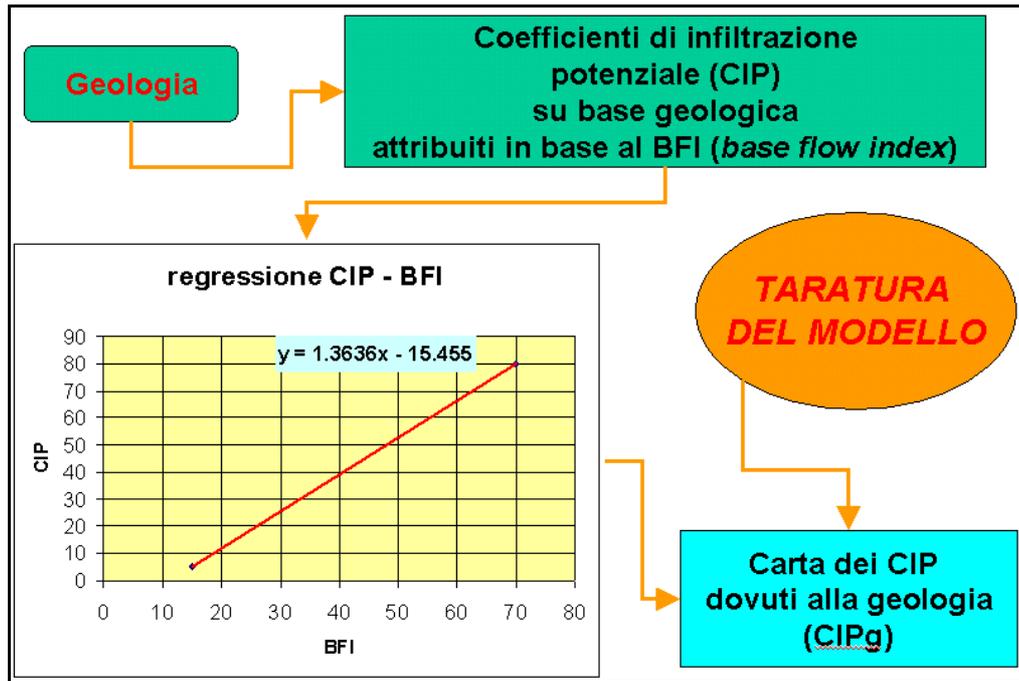


Figura 92 - Procedura per l'elaborazione dei coefficienti di infiltrazioni dovuti alla geologia

Tale procedura ha consentito di ottenere la carta dei coefficienti di infiltrazione potenziale dovuti alla geologia.

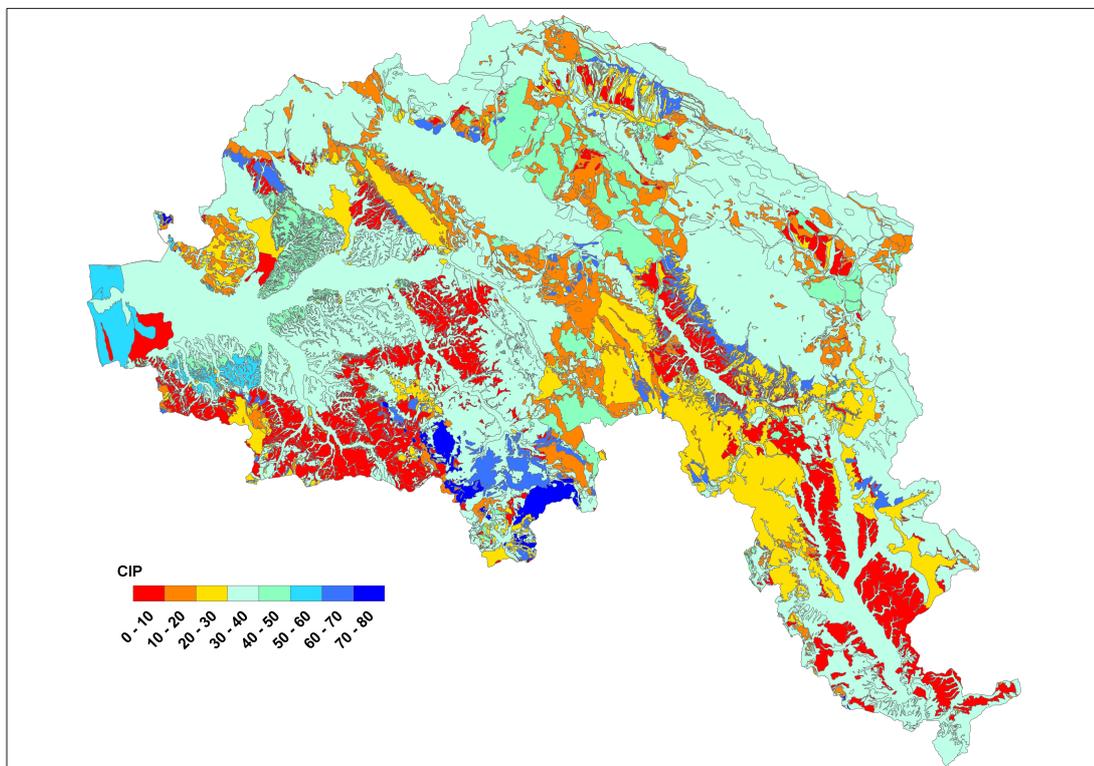


Figura 93 - Carta dei coefficienti di infiltrazione dovuti alla geologia

Coefficiente di infiltrazione dovuto alla pendenza e all'uso del suolo

Il modello delle pendenze è derivato dal modello digitale del terreno, con struttura cellulare a risoluzione 10 m. Le pendenze sono state suddivise in classi in funzione della loro influenza sull'infiltrazione, dalla classe più favorevole (classe 1, le basse pendenze) alla più sfavorevole (classe 4, le alte pendenze):

classe	descrizione
1	0 – 2 %
2	2 – 10 %
3	10 – 20 %
4	> 20 %

Tabella 48 - classi di pendenza

La scelta degli intervalli di pendenza di ogni classe fa riferimento a dati bibliografici.

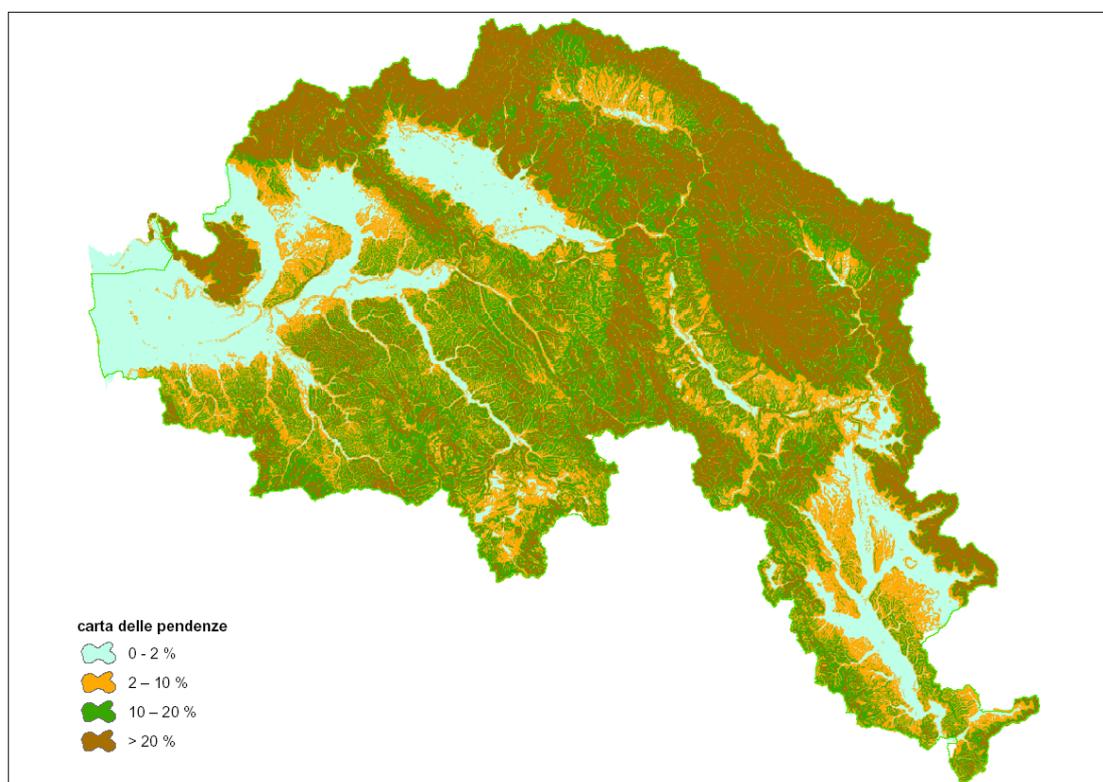


Figura 94 - Carta delle pendenze

L'intero bacino è stato quindi suddiviso nelle quattro classi suddette. L'appartenenza alla classe 1 di una porzione di territorio sta a significare che l'acqua tende più facilmente ad infiltrarsi, a parità di altri fattori; al contrario, in classe 4, l'acqua sarà facilitata a scorrere per ruscellamento sui versanti, alimentando il reticolo superficiale.

L'uso del suolo nel bacino è stato determinato attraverso la carta di copertura del territorio *Corine land cover*.

Il *Corine* individua 44 classi di uso del suolo. Per i nostri fini, ovvero per la stima dell'influenza sull'infiltrazione efficace 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), aggiornati dai recenti lavori di Barazzuoli ed altri (1986).

Descrizione Corine Land Cover 2001 3L	CODE3L	Classe	Descrizione
Tessuto urbano continuo	111	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Tessuto urbano discontinuo	112	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Aree industriali o commerciali	121	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Reti stradali e ferroviarie e spazi accesso	122	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Aree portuali	123	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Aeroporti	124	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Aree estrattive	131	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Discariche	132	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Cantieri	133	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Rocce nude, falesie, affioramenti	332	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Paludi interne	411	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Paludi salmastre	421	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Corsi d'acqua canali e idrovie	511	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Bacini d'acqua	512	10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
Aree verdi urbane	141	20	Pascoli
Aree sportive e ricreative	142	20	Pascoli
Prati stabili	231	20	Pascoli
Aree a pascolo naturale e praterie d' alta quota	321	20	Pascoli
Brughiere e cespuglietti	322	20	Pascoli
Aree con vegetazione rada	333	20	Pascoli
Aree percorse da incendi	334	20	Pascoli
Seminativi in aree non irrigue	211	30	Terra coltivata, boscata
Vigneti	221	30	Terra coltivata, boscata
Frutteti e frutteti minori	222	30	Terra coltivata, boscata
Oliveti	223	30	Terra coltivata, boscata
Colture annuali associate a colture permanenti	241	30	Terra coltivata, boscata
Sistemi colturali e particellari complessi	242	30	Terra coltivata, boscata
Aree prevalentemente occupate da colture	243	30	Terra coltivata, boscata
Aree agro-forestali	244	30	Terra coltivata, boscata
Aree a vegetazione sclerofila	323	30	Terra coltivata, boscata
Aree a vegetazione boschiva e arbustiva	324	30	Terra coltivata, boscata
Spiagge, dune, sabbie e alvei ghiaiosi	331	30	Terra coltivata, boscata
Boschi di latifoglie	311	40	Bosco d'alto fusto
Boschi di conifere	312	40	Bosco d'alto fusto
Boschi misti	313	40	Bosco d'alto fusto

Tabella 49 - Tabella di decodifica delle classi di uso del suolo del Corine land cover

Le classi finali pertanto, in sintesi, sono:

Classe	Descrizione
10	Aree urbanizzate o Roccia nuda
20	Pascoli
30	Terra coltivata, boscata
40	Bosco d'alto fusto

Tabella 50 - classi di uso del suolo

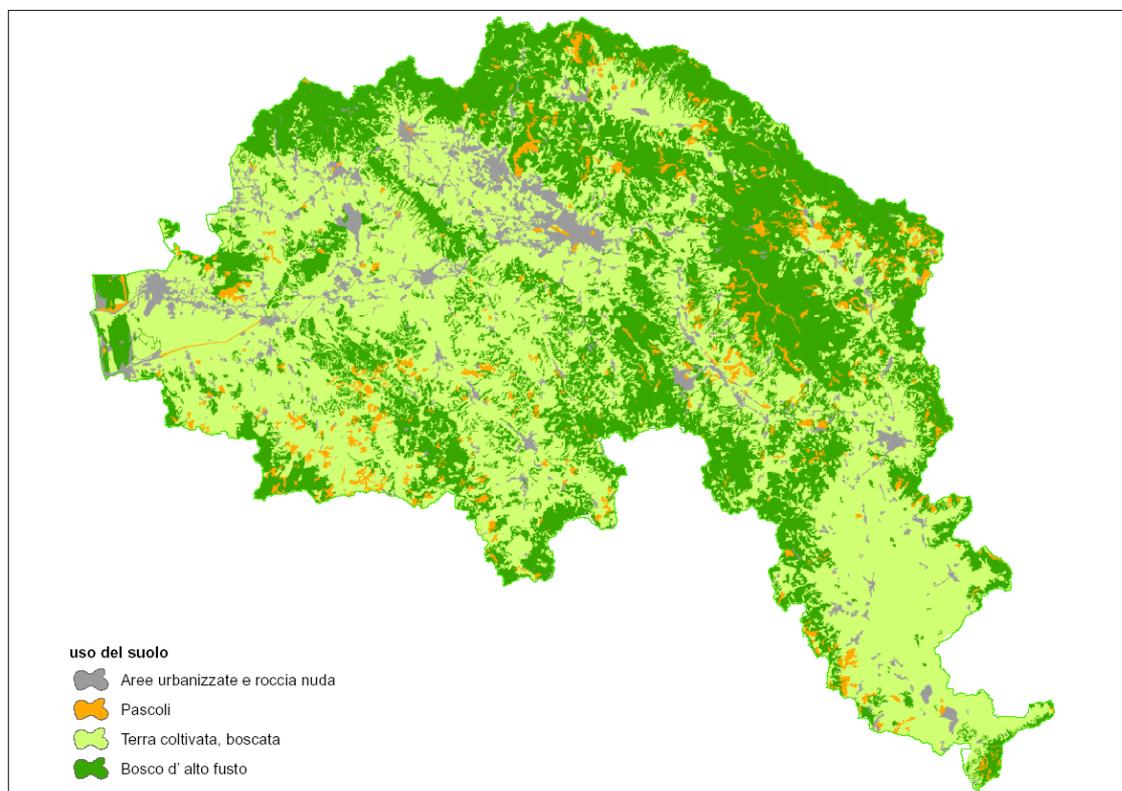


Figura 95 - Carta dell' uso del suolo

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.

Con lo scopo di assegnare un coefficiente unico che racchiudesse in se gli aspetti legati a pendenza e uso del suolo, i relativi tematismi sono stati incrociati tramite la seguente matrice:

		Uso suolo			
		10	20	30	40
Pendenza	1	B	A	E	E
	2	B	M	A	E
	3	B	M	M	A
	4	B	B	M	A

Tabella 51 - matrice pendenza / uso del suolo

Dall'incrocio delle classi di pendenza e uso del suolo, si ricavano quattro ulteriori classi di qualità (da elevata a bassa) che hanno lo scopo di fornire una stima dell'influenza dei parametri considerati sulla capacità di infiltrazione. Alla classe corrispondente viene successivamente assegnato un coefficiente numerico, in forma percentuale, producendo una carta dei *coefficienti Pendenza/Usò del suolo*. La schematizzazione ottenuta è stata quindi sottoposta ad un processo di validazione e taratura che, per iterazioni successive, ha portato ai valori finali dei coefficienti di seguito riportati.

Classe	Coefficiente
B	50
M	65
A	85
E	100

Tabella 52 - Classi attribuite ai coefficienti riduttivi del coefficiente di infiltrazione dovuto a pendenza e uso del suolo

Tale procedura, sebbene viziata da un approccio di tipo qualitativo e soggetta alla particolare sensibilità dell'operatore, ha il vantaggio di fornire una discreta schematizzazione di fattori difficilmente quantificabili in maniera deterministica alla scala di bacino.

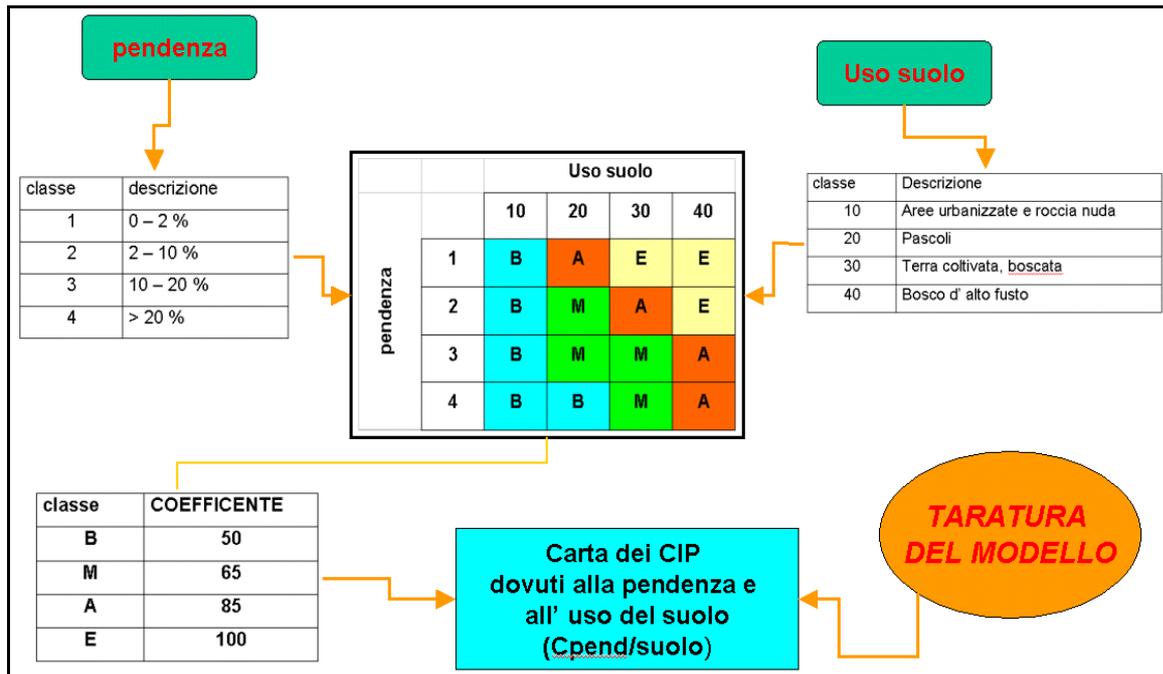


Figura 96 - Procedura per l'elaborazione dei coefficienti di infiltrazioni dovuti a pendenza e uso del suolo

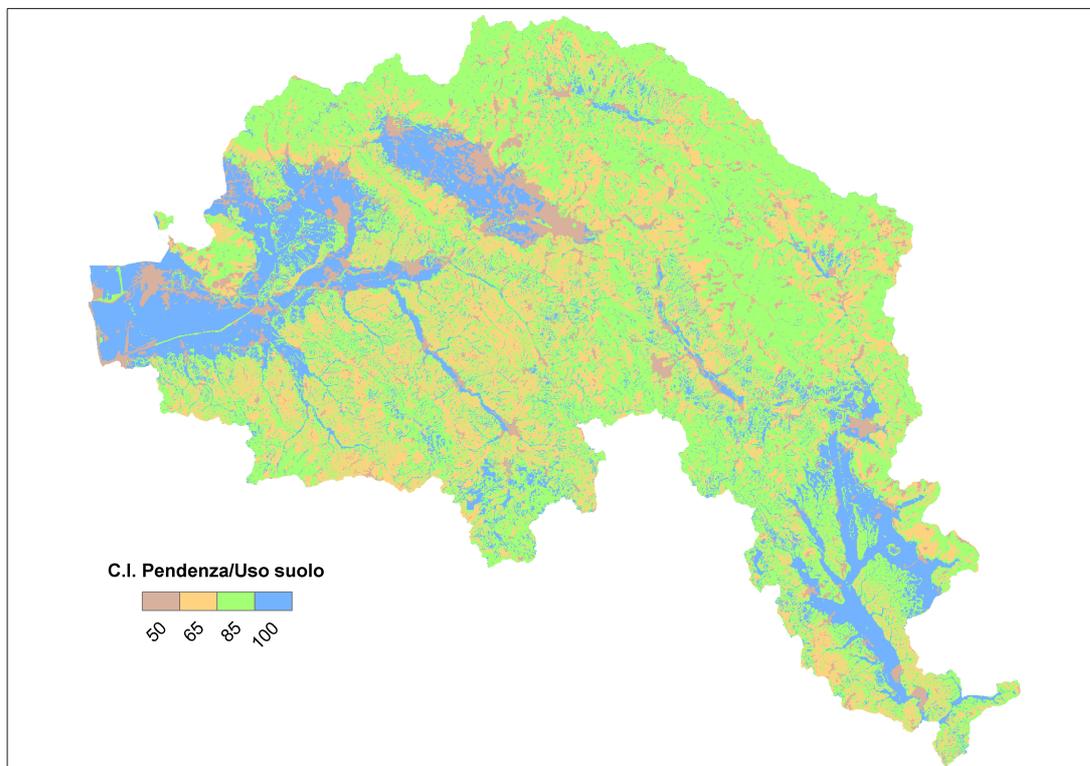


Figura 97 - Carta dei coefficienti di infiltrazioni dovuti a pendenza e uso del suolo

Carta dell'infiltrazione efficace

La distribuzione dell'infiltrazione efficace (Tav. 3) è stata ottenuta applicando la seguente espressione:

$$I_{eff} = P_{eff} \times CIPg \% \times C_{pend/suolo} \%$$

dove:

P_{eff} = pioggia efficace

CIPg = coefficiente di infiltrazione dovuto alla geologia

C_{pend/suolo} = coefficiente del CIPg dipendente da pendenza e uso del suolo

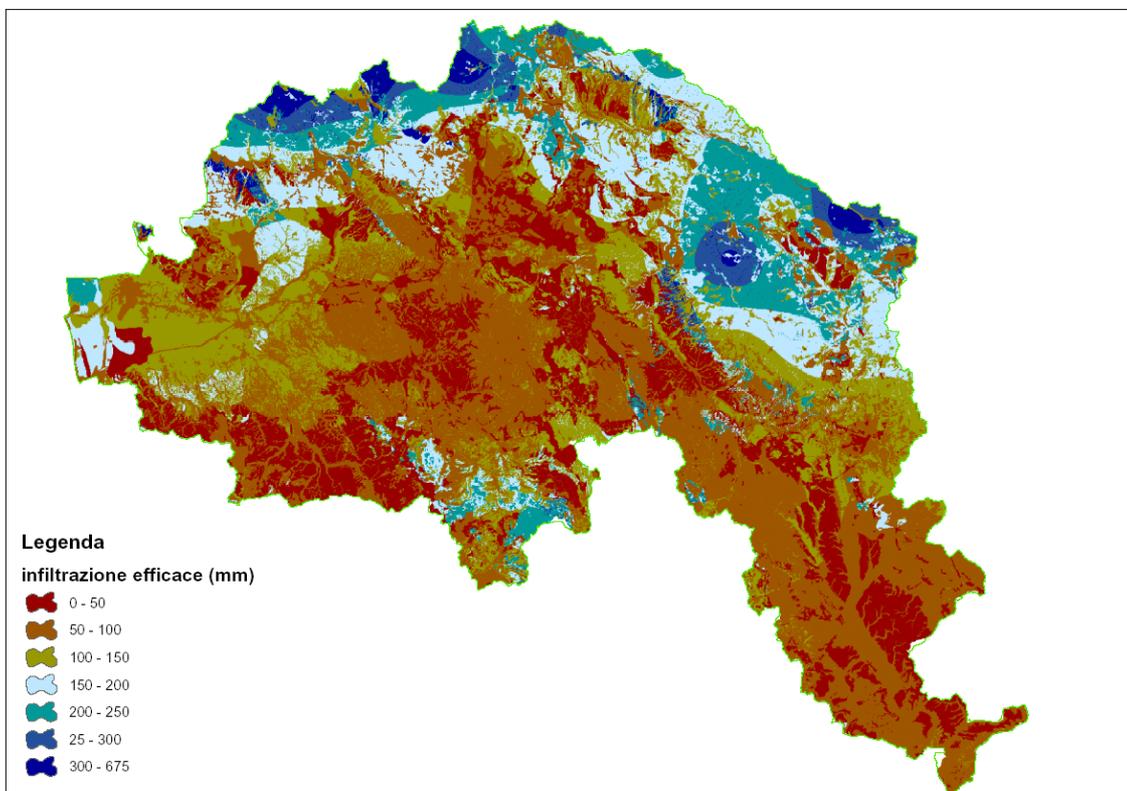


Figura 98 - Carta dell' infiltrazione efficace del bacino del fiume Arno

Alla fine dell'elaborazione ad ogni cella del bacino in scala 10m x 10m è pertanto associato un valore di infiltrazione efficace.

Taratura e calibrazione del modello

In considerazione dell'approccio quali-quantitativo utilizzato si è ritenuto opportuno procedere ad un processo di taratura e validazione del modello di infiltrazione che potesse minimizzare gli errori di tipo soggettivo. La taratura 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.

La taratura è stata svolta confrontando il deflusso di base naturale, esente dai prelievi, registrato alle stazioni con il valore di infiltrazione efficace ricavato dalle elaborazioni svolte.

La taratura è stata effettuata sui sottobacini riportati nella seguente figura.

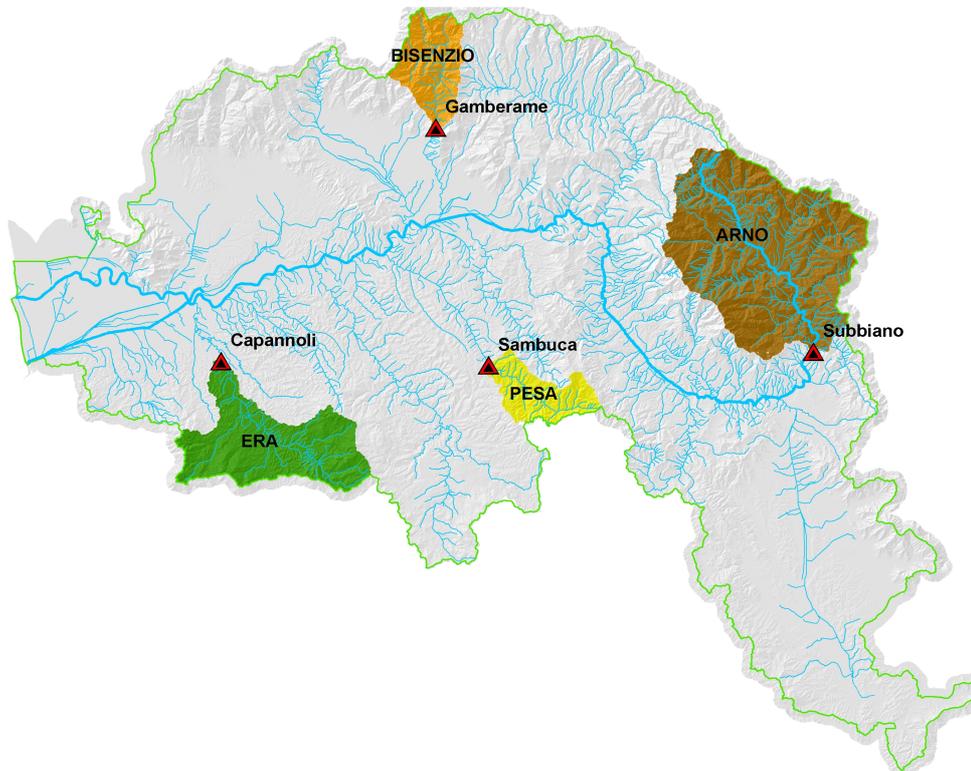


Figura 99 - Bacini di taratura

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). Il deflusso di base è stato ricavato seguendo il metodo delle portate mensili caratteristiche, partendo da valori misurati alla stazione di chiusura del bacino sotteso, secondo la seguente espressione:

$$Db \text{ naturale} = Q_{\text{min}} \text{ giornaliera di ogni mese (1993/2006)} + Q \text{ dissipata da pozzi e derivazioni}$$

Il processo di taratura consente, per approssimazioni successive, di arrivare all'obiettivo fissato, che consiste nel mantenere lo scarto tra i valori all'interno del 15%.

Di seguito sono riportati i valori di infiltrazione ottenuti nel processo di taratura e calibrazione sui sottobacini considerati confrontati con il Db naturale misurato.

	Db naturale (mm/anno)	Infiltrazione media sul sottobacino (mm/anno)
Subbiano (F. Arno)	176	187
Gamberame (F. Bisenzio)	244	230
Capannoli (F. Era)	39	46
Sambuca (T. Pesa)	77	87
Bacino Arno		105.5

Tabella 53 - Confronto tra deflusso naturale misurato e infiltrazione media sul sottobacino ottenuta dal modello per i sottobacini considerati

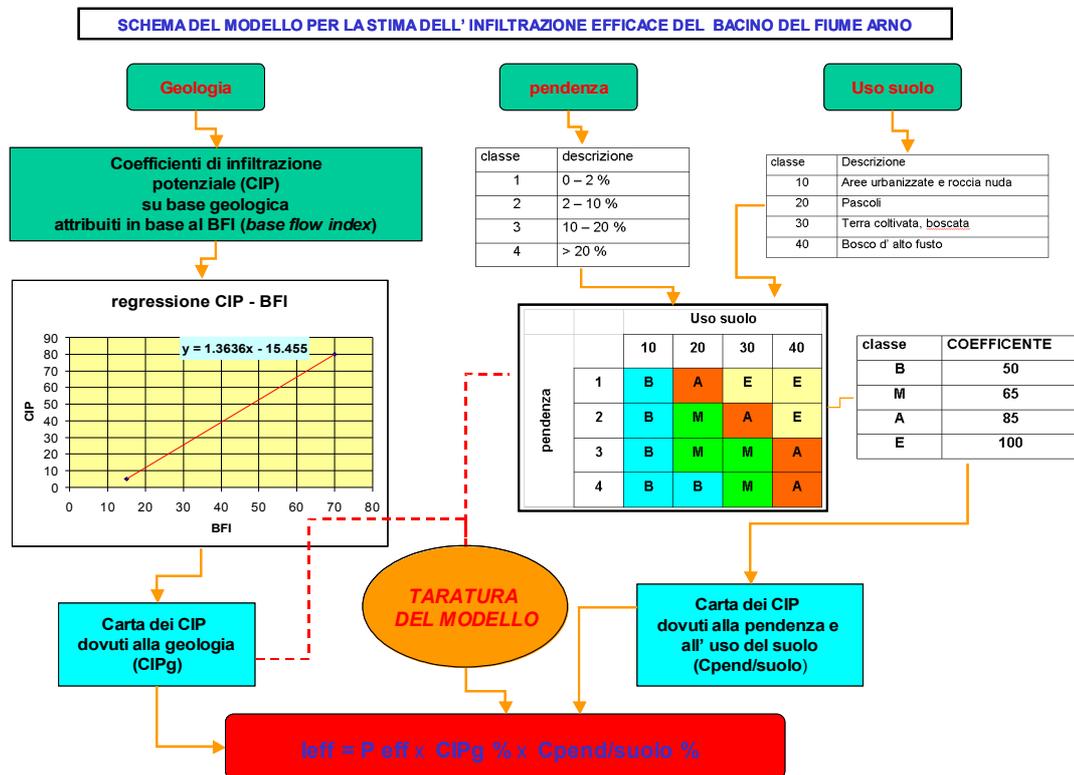


Figura 100 - Schema completo del modello di infiltrazione efficace

Bilanci degli acquiferi significativi del bacino del fiume Arno

Il bilancio è stato redatto sui 17 acquiferi di pianura significativi riportati in Tavola A.

Per ogni acquifero sono state definite le caratteristiche geometriche e le condizioni al contorno. Per buona parte degli acquiferi significativi del bacino i limiti corrispondono al contatto superficiale fra i depositi alluvionali attuali e recenti con le rocce incassanti, di solito a bassa permeabilità. È il caso, ad esempio, del Valdarno Superiore, dove i sedimenti alluvionali recenti dell'Arno sono stati depositi in una valle scavata nelle argille lacustri; oppure della pianura del Medio Valdarno, dove i depositi alluvionali recenti sono delimitati da rocce litoidi a bassa permeabilità, salvo che nella conca di Firenze dove le alluvioni dell'Arno sono comprese entro depositi lacustri.

In altri bacini, invece, i depositi alluvionali recenti confinano con depositi simili, quali alluvioni antiche o sedimenti fluvio-lacustri rendendo oltremodo difficile la definizione dell'ambito geometrico dell'acquifero. In questi casi si è scelto di considerare l'acquifero esteso al sistema idrogeologico che in ogni caso, anche se con permeabilità diverse, viene interessato sia dalle stesse modalità di circolazione idrica che dallo sfruttamento. In tale condizione si trovano ad esempio il Casentino e la Valdichiana.

In generale il bilancio idrico di un acquifero alluvionale può essere sintetizzato secondo la seguente equazione, nella quale i termini di sinistra rappresentano i volumi in entrata e quelli di destra i volumi in uscita:

$$I_a + A_s + A_v + I_f + A_{sac} = E_m + D_f + D_s$$

Dove:

I_a = infiltrazione areale diretta delle acque di pioggia;

A_v = infiltrazione delle acque che scorrono sui versanti ed alimentano le falde nella fascia pedecollinare;

I_f = infiltrazione dagli alvei fluviali;

A_s = apporti di acque sotterranee dalle aree di ricarica;

A_{sac} = apporti da acquiferi contermini

E_m = emungimenti dei pozzi;

D_f = drenaggio da parte dei corsi d'acqua;

D_s = deflusso sotterraneo verso gli acquiferi confinanti.

Per la definizione dei termini di cui sopra sono state usate le risultanze di studi e indagini specificatamente svolti all'interno della Segreteria Tecnica dell'Autorità di bacino, o di consulenze con Università e professionisti incaricati (vedi appendici).

I termini che influiscono quantitativamente in misura maggiore nella determinazione della ricarica sono, oltre all'infiltrazione areale, gli apporti sotterranei dalle aree di ricarica e i flussi idrici determinati dal rapporto fiume falda.

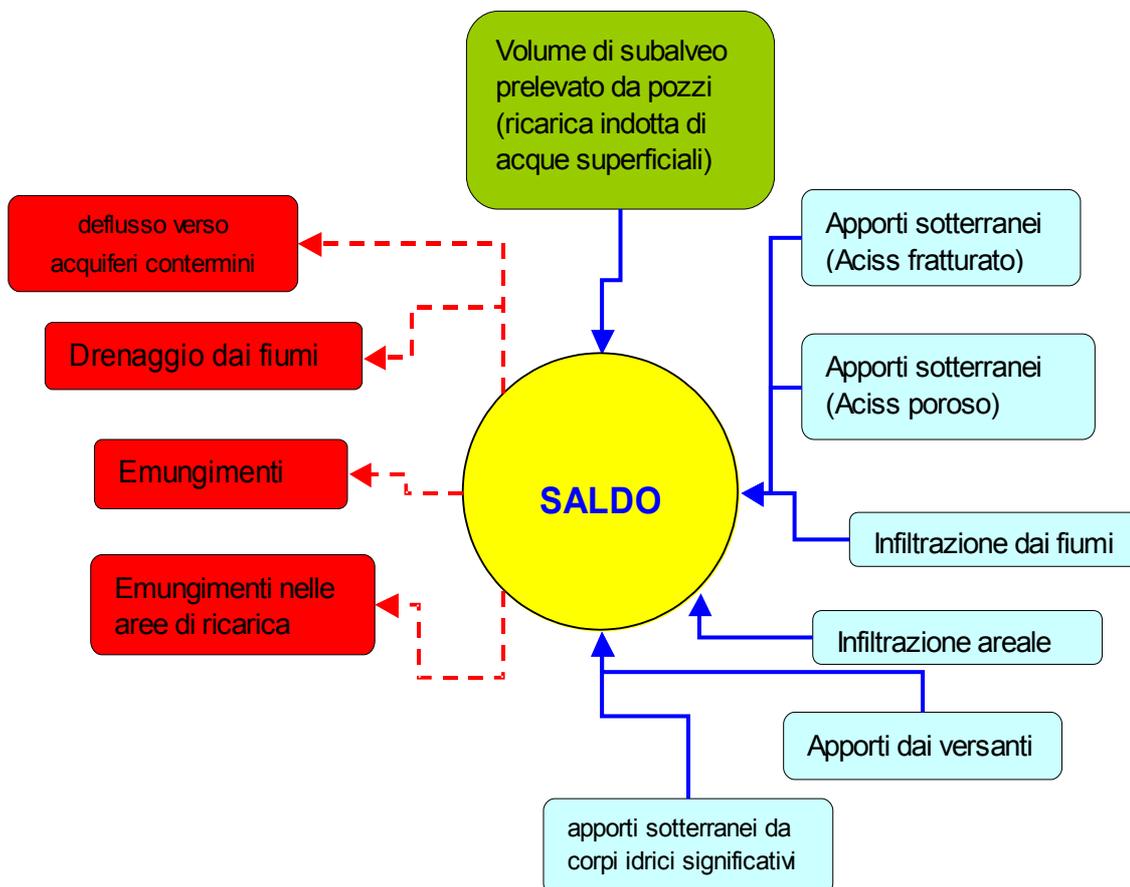


Figura 101 - Schema concettuale del bilancio di un acquifero: le frecce azzurre indicano le entrate, le rosse le uscite

Per ciascun acquifero significativo sono stati schematizzati ed identificati i meccanismi di ricarica e i termini del bilancio. In particolare sono state individuate in primo luogo le zone di alimentazione, i rapporti con le acque superficiali e con gli acquiferi contermini, determinando le condizioni al contorno. Una volta identificata la struttura idrogeologica di ogni acquifero, con i conseguenti volumi naturali in entrata ed uscita, sono stati sottratti i prelievi.

Nelle schede del bilancio redatte per ciascun acquifero alluvionale, è descritto nel dettaglio il modello adottato e vengono esplicitati i termini del bilancio considerati.

Nei paragrafi che seguono si descrive la metodologia adottata per la quantificazione dei termini di bilancio.

Metodologia di calcolo dei termini del bilancio idrico

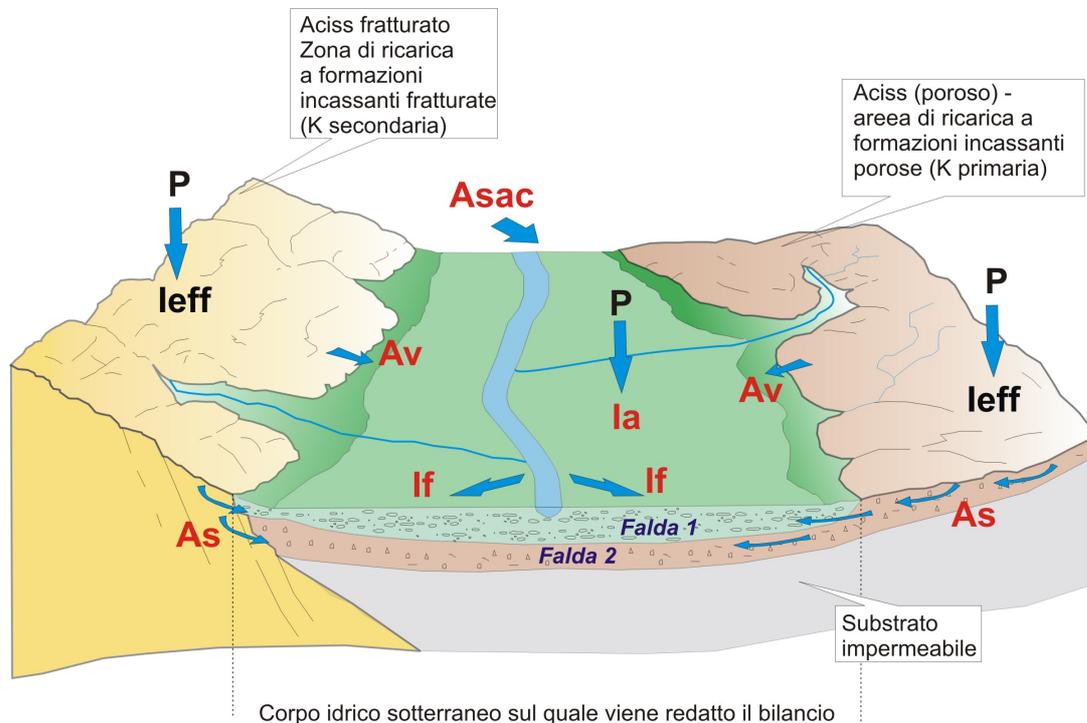


Figura 102 - Schema generale della ricarica di un acquifero

L'infiltrazione diretta dell'acqua di pioggia (Ia)

Per l'infiltrazione diretta è stata usata la metodologia che ha permesso di ricavare l'infiltrazione efficace per l'intero bacino idrografico, precedentemente illustrata nel dettaglio. Per ogni acquifero è stato stimato il valore relativo all'infiltrazione diretta, attribuendo il relativo valore di infiltrazione efficace, ricavato dal modello, all'affioramento in superficie.

L'infiltrazione delle acque che scorrono sui versanti ed alimentano le falde nella fascia pedecollinare (Av)

Le carte con le curve isopiezometriche delle pianure alluvionali mostrano di solito isopieze parallele ai contatti con le rocce incassanti ed un gradiente idraulico elevato ai margini delle pianure, dove ci sono depositi di conoide e di versante. Ciò significa che dai versanti arriva un contributo di alimentazione alle falde della pianura, che può avvenire secondo percorsi diversi:

- ruscellamento superficiale, durante le piogge;
- deflusso ipodermico, durante le piogge e per qualche tempo dopo la loro cessazione;

Il termine Av è certamente di entità molto diversa da zona a zona: dove i terreni di bordo pianura sono depositi colluviali provenienti da rocce a bassa permeabilità, la maggior parte dell'acqua di scorrimento dai versanti verrà incanalata nel reticolo idrografico e solo una piccola parte s'infiltrerà nel sottosuolo; dove ci sono conoidi alluvionali permeabili, una parte consistente dell'acqua di ruscellamento superficiale andrà ad alimentare gli acquiferi della pianura. Nel caso che i sedimenti della pianura

siano a contatto con rocce permeabili, da queste può venire anche un importante afflusso sotterraneo, che però è difficilmente separabile dagli altri due apporti.

Il termine AV è stato stimato considerando l'infiltrazione nell'area di pianura di una quantità di acqua pari al deflusso superficiale, non organizzato nel reticolo, relativo ad una fascia di 100 m dal bordo dell'acquifero. In pratica si considera che la quantità di pioggia efficace che non si infiltra nel terreno nella fascia finale del rilievo, una volta raggiunta la pianura, non essendo organizzata in un reticolo permanente, si infiltro nel sottosuolo e vada ad alimentare l'acquifero. Questo termine, in ogni caso, è percentualmente poco rilevante ai fini del bilancio.

L'Infiltrazione dagli alvei dei corsi d'acqua (If)

È un termine del bilancio importante perché gli alvei fluviali sono, per buona parte del loro percorso nelle pianure, più alti del livello freatico delle falde; ciò comporta una ricarica per infiltrazione dagli alvei, spesso ghiaiosi e quindi molto permeabili.

In mancanza di misure dirette, una valutazione approssimativa si può ottenere utilizzando la freaticimetria della fascia dell'acquifero percorsa dal corso d'acqua ed applicando la legge di Darcy alle sezioni di acquifero coincidenti con i due argini fluviali. L'incertezza del calcolo nasce dalla variabilità nel tempo dei rapporti fiume-falda: anche se si dispone di freaticimetrie di dettaglio, occorre considerare che l'infiltrazione aumenta notevolmente nei giorni di piena. Capecchi e Pranzini (2001), ad esempio, sulla base delle ricostruzioni freatiche disponibili per le pianure della provincia di Firenze e considerate le diverse situazioni (permeabilità delle alluvioni, ampiezza degli alvei, gradiente idraulico della superficie freatica nei tratti fluviali pendenti) hanno adottato valori d'infiltrazione compresi fra 500 e 600 m³/anno per metro lineare di tratto pendente.

Per la determinazione dell'infiltrazione dagli alvei dei corsi d'acqua è stata usata la metodologia sopra indicata, ricostruendo il valore di infiltrazione per i tratti di reticolo interessanti gli acquiferi in oggetto. Questo termine è stato confrontato con i risultati dello studio redatto per conto dell'Autorità di bacino del Fiume Arno dal Prof. G. Pranzini "Il Bilancio idrico degli acquiferi alluvionali più significativi del bacino dell'Arno" (2005), riportato in Appendice.

Gli apporti di acque sotterranee dalle aree di ricarica (As)

Questo termine rappresenta in alcuni acquiferi la voce dominante di bilancio. Ciò vale in particolare per le falde profonde confinate, in cui gli apporti idrici derivano quasi esclusivamente dall'infiltrazione efficace nelle zone di ricarica. In tale situazione si trovano ad esempio le falde confinate dell'acquifero di Santa Croce sull'Arno e per quella di Bientina.

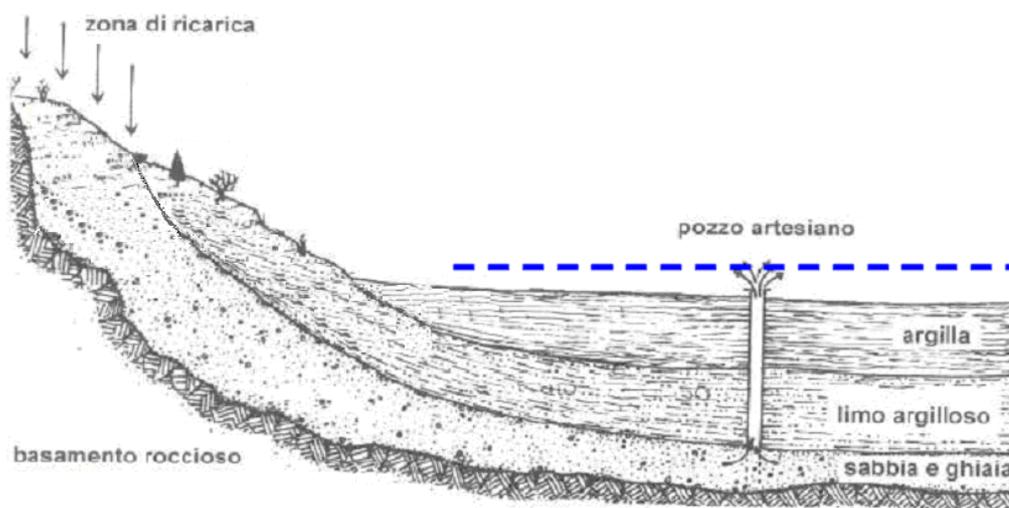


Figura 103 - Schema della ricarica di un acquifero confinato

Per potere quantificare questo termine, occorre identificare le aree di ricarica, in modo da stimare la quantità di pioggia che si infiltra e il flusso idrico in entrata all'acquifero considerato.

In un acquifero confinato, il flusso idrico sotterraneo avviene dalle zone di ricarica a quelle di scarica. Le zone di ricarica (o di alimentazione) sono costituite dai rilievi in cui la porzione di precipitazione che si infiltra nel terreno, mediante un percorso sotterraneo, va a raggiungere l'acquifero in oggetto. Le zone di scarica (o di drenaggio) si localizzano nelle vallate occupate dai corsi d'acqua, nei fronti sorgivi, nelle superfici d'acqua libera (laghi, mari). Il motore del deflusso sotterraneo è la differenza di quota Δh (differenza di carico) che genera gradienti idraulici. I limiti idrodinamici dei sistemi sono costituiti dalle linee di spartiacque sotterranei e dagli assi di drenaggio di superficie.

La stima del termine A_s non è facilmente determinabile, soprattutto per la necessità di una buona base dati. In letteratura uno dei metodi utilizzati è quello di calcolarlo applicando la legge di Darcy alla sezione di confine, conoscendo lo spessore dell'acquifero, la piezometria media annua e la permeabilità dell'acquifero; purtroppo tale metodo, pur affidabile, necessita di piezometrie aggiornate per il periodo considerato dal bilancio, cosa che non è disponibile nel nostro caso. Pertanto si è optato per una metodologia indiretta con successiva taratura per aree dove invece sono disponibili piezometrie aggiornate e è quindi possibile applicare Darcy.

Le aree di alimentazione degli acquiferi possono essere definite come le zone da cui quest'ultimi ricevono flussi idrici, che per l'appunto li "ricaricano". Le aree di alimentazione sono state identificate, per ogni acquifero, in base a criteri geologici e strutturali: la loro capacità di ricarica dipende oltre che dai rapporti strutturali con l'acquifero anche dalla infiltrazione efficace e permeabilità dei tipi litologici che le costituiscono. Le aree di ricarica possono dividersi in dirette, formazioni o strutture permeabili all'interno del perimetro dell'acquifero, o indirette, ovvero quelle poste anche a distanza notevole dall'acquifero il quale viene ricaricato, nel caso, con flussi sotterranei.

Per tutti gli acquiferi su cui è stato redatto il bilancio sono state in primo luogo identificate le condizioni al contorno, in sostanza quali sono le formazioni geologiche

che, data la loro permeabilità, possono avere scambi idrici importanti con il corpo idrico sotterraneo considerato.

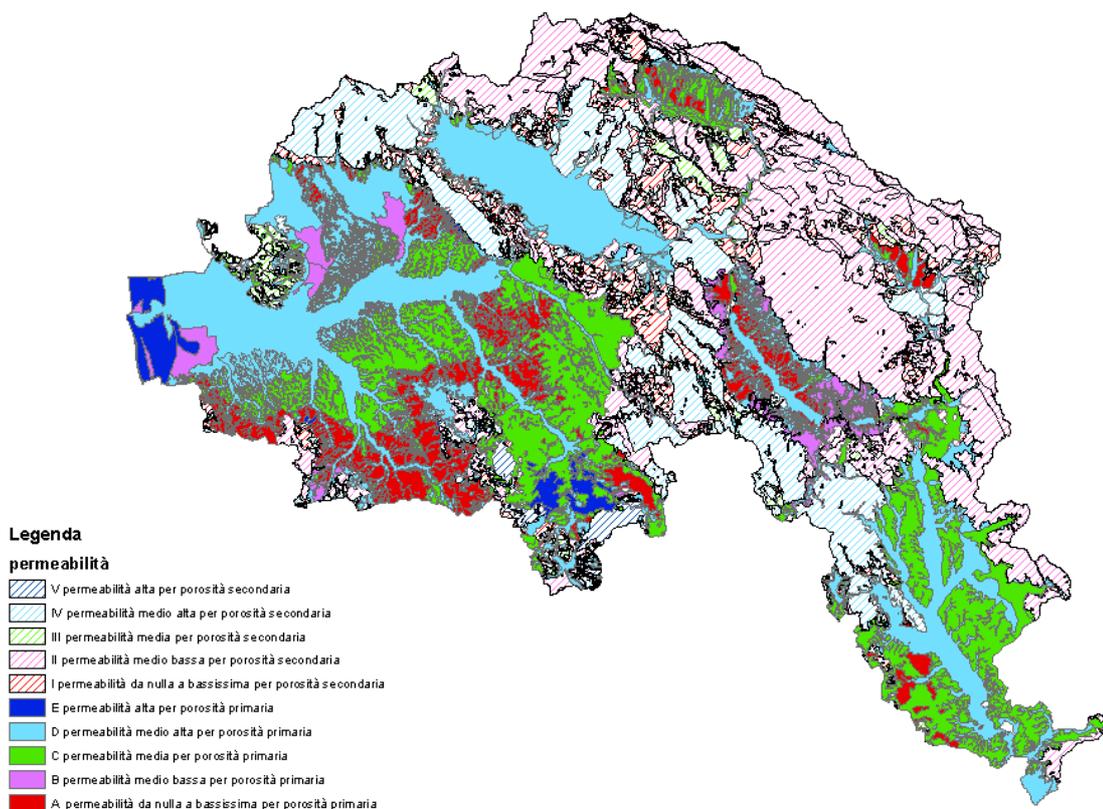


Figura 104 - Carta della permeabilità

Le aree di ricarica la cui identificazione è propedeutica alla determinazione del termine apporti sotterranei (As), sono state individuate avvalendosi della Carta Geologica d'Italia (scala 1:100.000) e utilizzando dati geologici di dettaglio ove disponibili. La delimitazione è quindi suscettibile di miglioramenti e modifiche, in particolare conseguenti all'utilizzo di cartografia geologica di maggior dettaglio.

Le aree di alimentazione si possono suddividere in due distinte tipologie, in funzione del loro tipo di permeabilità:

- Aree a formazioni incassanti rocciose fratturate / carsiche (permeabilità secondaria) (Aciss fratturate)
- Aree a formazioni incassanti porose (permeabilità primaria) (Aciss porose)

Per la determinazione delle Aciss appartenenti alle formazioni incassanti rocciose fratturate/carsiche l'ipotesi di base è che la circolazione idrica sia guidata esclusivamente dalla differenza di permeabilità satura (K_{sat}) tra lo spessore superficiale a fratture frequenti o beanti e il mezzo sottostante poco fratturato o chiuso; l'interfaccia viene supposta parallela alla superficie topografica; il mezzo permeabile fratturato viene considerato omogeneo. La stima dell'apporto sotterraneo probabile (generalmente utilizzata per la definizione del bilancio) viene effettuata considerando come area di alimentazione i bacini e interbacini sottesi ai tratti del reticolo superficiale intersecanti il limite dell'acquifero con ordine di Strahler ≤ 2 . Tale metodo è basato sull'ipotesi che l'acqua sotterranea nei sottobacini di affluenti di ordine superiore ha una maggior probabilità di emergere, alimentando il deflusso superficiale, piuttosto che di infiltrarsi e di scorrere per flusso sotterraneo. Il metodo, indipendente dalla profondità

dell'acquifero, è pertanto di tipo essenzialmente topografico, applicabile a tutti i bacini, e in buona approssimazione corretto per le aree di ricarica che insistono su litotipi argillitici, arenacei, ofiolitici. Sono stati invece scorporati i litotipi calcarei in cui la circolazione idrica può seguire circuiti diversi e molto più rapidi e svincolati dalla topografia.

Per la determinazione delle *Aciss* appartenenti alle formazioni incassanti porose (importanti per gli acquiferi di Bientina, Lucca, Pianura di Pisa, Val d'Era, Chiana e Empoli), l'ipotesi di base è che la circolazione idrica sia guidata esclusivamente da differenze di permeabilità satura tra i diversi litotipi, indipendenti dalla topografia. La circolazione idrica è guidata dalla giacitura dei corpi litologici che, sostanzialmente appartengono ai complessi neo-autoctoni. Salvo diverse evidenze si può assumere l'immersione coincidente con la direzione di flusso del reticolo superficiale principale. L'inclinazione è ricavabile da dati geologico/strutturali a scala regionale; sulla base di considerazioni geometriche si ricava la larghezza corrispondente all'ampiezza dell'*Aciss*, secondo la direzione di drenaggio, ed una corrispondente larghezza della fascia che delimita l'area di alimentazione. Sempre in base a considerazioni geometriche relative all'inclinazione della stratificazione delle formazioni e alla topografia del terreno, viene considerata la percentuale di infiltrazione che riemerge e che torna ad alimentare il reticolo superficiale.

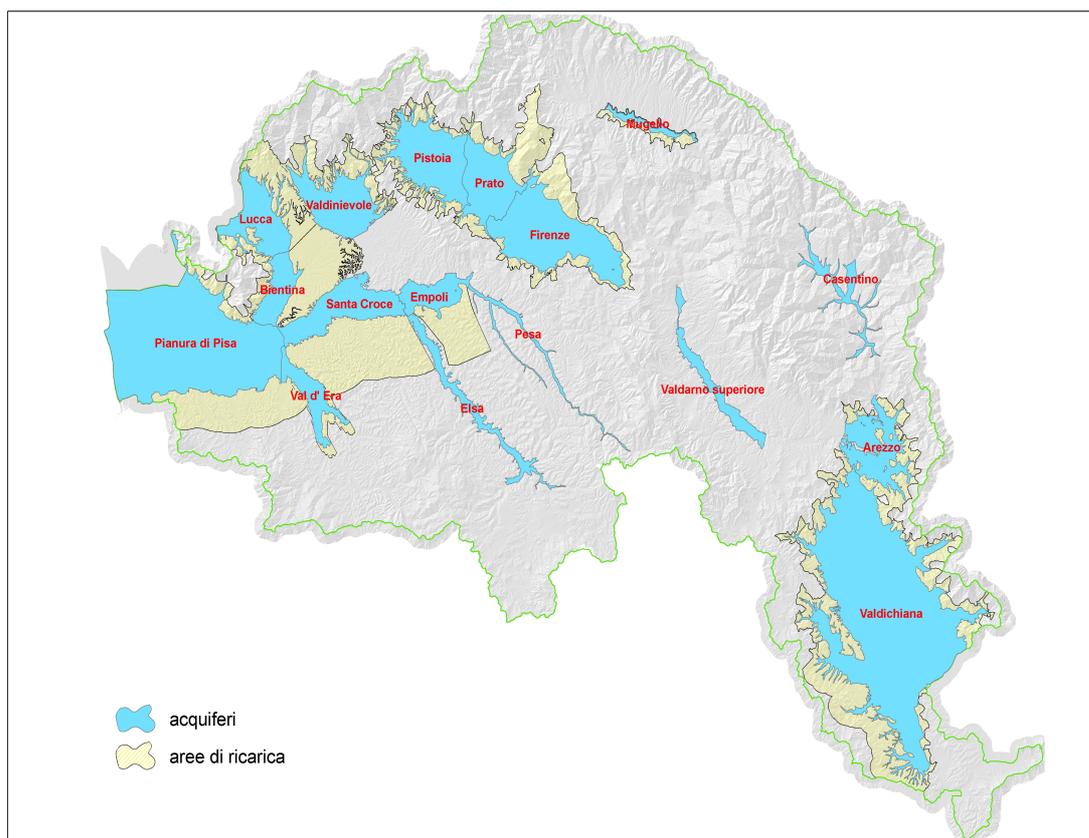


Figura 105 - Identificazione degli acquiferi e delle rispettive aree di ricarica

Le aree di ricarica sono quelle mostrate nella soprastante figura.

In alcuni casi non è stata delimitata alcuna area di ricarica (es: Valdarno superiore, Pesa, Elsa, Casentino) o perché le Formazioni limitrofe hanno permeabilità basse e quindi forniscono flussi idrici trascurabili (Valdarno superiore), o per la geometria

dell'acquifero e per la struttura delle formazioni incassanti che non permettono un flusso idrico significativo verso lo stesso (Pesa, Elsa, Casentino).

La stima della ricarica verso l'acquifero è stata redatta considerando su tali aree l'infiltrazione efficace e sottraendo i prelievi e le riemergenze da sorgenti. Questo metodo è applicabile all'intero bacino, e, una volta perimetrale le aree di ricarica, necessita solamente del dato di infiltrazione efficace, calcolato con il modello precedentemente illustrato riportato.

Tale struttura concettuale è stata validata laddove erano disponibili dati piezometrici aggiornati o studi di dettaglio. In sostanza sono stati confrontati i dati di ricarica ottenuti con la metodologia sopra illustrata, con i volumi calcolati mediante l'applicazione della legge di Darcy nelle aree oggetto di campagna piezometrica. Tali verifica è stata svolta per l'acquifero della Val di Chiana, dove lo scarto tra il valore derivato dalle piezometrie e quello determinato in via indiretta, è risultato inferiore al 10% e pertanto ritenuto accettabile.

Gli apporti da acquiferi contermini (Asac)

Le falde delle pianure possono essere alimentate da acquiferi confinanti nei casi in cui il bilancio riguarda solo una parte di un acquifero alluvionale.

Tale termine non è da confondere con il termine "apporti dalle aree di ricarica", descritto nel precedente paragrafo: negli apporti da acquiferi contermini sono compresi i volumi idrici in entrata da un corpo idrico significativo e non da aree in cui il fenomeno preponderante è la ricarica all'acquifero stesso. Tale termine assume rilevanza in casi, come quello della pianura di Lucca, in cui l'apporto considerato si riferisce al flusso idrico in entrata dalla porzione di acquifero ricadente nel bacino del Serchio.

Per il calcolo di questo apporto si è applicata la legge di Darcy alla sezione di confine, noto lo spessore dell'acquifero, la piezometria media annua e la permeabilità dell'acquifero.

Interazione fiume – falda (Volume di subalveo prelevato da pozzi, ricarica indotta di acque superficiali)

Un termine importante nella redazione dei bilanci è dato dal rapporto fiume – falda, soprattutto nei sistemi fortemente antropizzati. In condizioni naturali i rapporti fra acquifero e il fiume possono avere sia verso che direzione variabile nell'anno. In genere però alla chiusura del sottobacino o dove il fiume comincia a scorrere in sedimenti fini e gli acquiferi cominciano a diventare confinanti, la sommatoria dei contributi ha segno negativo (il fiume drena la falda) o nullo. La filtrazione di volumi dai fiumi risulta comunque un termine importante per alcune aree del bacino (caso tipico sono le alluvioni dell'Arno) in cui il rapporto falda – fiume è rilevante e positivo.

Molto più importante è l'interazione fiume – falda nei sistemi antropizzati, in cui la presenza di pompaggi da pozzi o da campi pozzi ubicati in aree di subalveo altera e modifica radicalmente l'assetto piezometrico, generando forti flussi d'acqua che dal reticolo superficiale si infiltra nel sottosuolo, richiamata dai coni di depressione piezometrica indotti dai pompaggi. Questa ricarica indotta in molti casi risulta essere una voce percentualmente rilevante e permette di mantenere l'attuale regime di prelievo in condizione piezometrica sostenibile. Questo è valido laddove le portate dei fiumi (soprattutto nei periodi di magra) sono esenti da criticità di bilancio, come nel caso, ad esempio, dell'Arno, mentre in alcuni casi tale sottrazione determina la criticità a carico del reticolo superficiale.

Per tenere conto di tale effetto, non esistendo dati specifici di riferimento (per lo meno non a scala di bacino), è stata individuata una fascia parallela ai corsi d'acqua e delimitata, oltre che con criteri idrogeologici, dalla geomorfologia, dove l'interazione falda – fiume è ipotizzabile con un buon grado di approssimazione. I volumi estratti dai

pozzi, ricadenti all'interno della fascia suddetta, ai fini del bilancio dell'acquifero, sono stati considerati come prelievi di acque superficiali.

Gli emungimenti dei pozzi (Em)

Nelle falde delle pianure alluvionali considerate costituisce il principale termine in uscita del bilancio delle falde. Ad ogni prelievo è associata una legge d'uso o un valore ricavabile tramite i contatori ai pozzi, laddove esistenti.

Il drenaggio da parte dei corsi d'acqua (Df)

È il termine opposto dell'infiltrazione dagli alvei dei corsi d'acqua e presenta gli stessi problemi per la misura. Il calcolo è stato svolto con la metodologia precedentemente illustrata.

Capecchi e Pranzini, per il bilancio degli acquiferi alluvionali della Provincia di Firenze (2001), hanno attribuito un valore di drenaggio di 400 m³/anno per metro lineare. Questo valore, un po' inferiore al tasso d'infiltrazione assunto per i tratti fluviali perdenti, è giustificato dalla considerazione che nei tratti in questione il gradiente idraulico della falda in fregio al corso d'acqua è minore di quello dei tratti perdenti.

Il deflusso sotterraneo verso gli acquiferi confinanti (Ds)

È stato determinato con lo stesso metodo dell'afflusso sotterraneo dagli acquiferi confinanti.

Calcolo della riserva idrica

Oltre al bilancio idrico medio, che fornisce la risorsa idrica, cioè il volume d'acqua mediamente sfruttabile, è utile una valutazione della riserva idrica che corrisponde al volume d'acqua medio immagazzinato nell'acquifero. Di solito la risorsa idrica è una parte della riserva; quanto minore è il rapporto fra la risorsa e la riserva tanto minore è il rischio di esaurimento della riserva; infatti una grande riserva fa da volano al sistema e consente di superare il susseguirsi di anni poco piovosi.

Il calcolo della riserva idrica si può fare con il seguente metodo.

Per un acquifero libero:

1. Calcolo del volume saturo dell'acquifero, mediante le litostratigrafie disponibili e la superficie freatica media; di solito il volume si ottiene ricostruendo le isopache dell'acquifero saturo.
2. Calcolo del volume d'acqua, moltiplicando il volume saturo per la porosità efficace *me*; quest'ultima corrisponde al coefficiente d'immagazzinamento *S* e si ottiene tramite prove di portata; in mancanza, si può fare riferimento ai valori di porosità efficace reperibili in letteratura per i litotipi che formano l'acquifero.

Per un acquifero confinato:

1. Calcolo del volume dell'acquifero; se l'acquifero è multistrato, occorre considerare il volume *netto*, cioè lo spessore dei soli livelli permeabili.
2. Calcolo del volume d'acqua, moltiplicando il volume dell'acquifero per la porosità efficace, che è diversa dal coefficiente d'immagazzinamento.

In realtà, nel caso di un acquifero confinato, la distinzione fra risorsa e riserva non è così netta come per un acquifero libero. Infatti, la variazione stagionale del livello piezometrico corrisponde solo in parte alla variazione del volume d'acqua immagazzinato ma principalmente alla variazione della pressione nell'acquifero. Un calcolo più corretto della riserva richiederebbe di sommare al volume d'acqua contenuto nell'acquifero anche quello corrispondente al prodotto del volume compreso fra la superficie piezometrica e il tetto dell'acquifero per il coefficiente d'immagazzinamento *S* dell'acquifero stesso. È opportuno ricordare, a tale proposito,

che per un acquifero confinato S è molto piccolo, quindi basta l'estrazione di un piccolo volume d'acqua per abbassare di molto la superficie piezometrica. Si deve però osservare che sono pochi i dati disponibili di S, in quanto ottenibili solo con prove di portata pozzo-piezometro. Inoltre, spesso tali prove di portata riguardano più acquiferi contemporaneamente, quindi il valore di S che risulta è un dato mediato fra gli acquiferi confinati e quello libero, se presente.

ACQUIFERO	RISERVE (Mmc)
Chiana	550
Arezzo	102
Casentino	16
Valdarno superiore	36
Pesa	10
Mugello	8
Elsa	31
Santa Croce	107
Valdinievole	60
Bientina	113
Pianura di Pisa	287
Lucca	223
Empoli	48
Firenze	68
Prato	108
Pistoia	90
Val d'Era	25

Tabella 54 -Riserve espresse in Mmc degli Acquiferi alluvionali significativi del Bacino dell'Arno

Bilancio degli acquiferi

I bilanci sono stati redatti secondo la metodologia ed i criteri sopra riportati.

Lo scenario temporale di riferimento è stato assunto nel periodo 1993-2006, periodo ritenuto significativo in funzione delle variazioni climatiche in atto, peraltro costellato da importanti estremi in termini di temperature e precipitazioni.

ACQUIFERO	AREA (Kmq)	PRECIPITAZIONI (mm)
Chiana	594	738
Arezzo	84	817
Casentino	32	1061
Valdarno superiore	39	801
Pesa	20	772
Mugello	13	958
Elsa	46	746
Santa Croce	94	817
Val di Nievole	99	1017
Bientina	44	860
Pianura di Pisa	407	860
Lucca	79	1001
Empoli	44	793
Firenze	172	773
Prato	86	934
Pistoia	118	1116
Val d'Era	42	810

Tabella 55 - Acquiferi alluvionali significativi del bacino dell'Arno, con le relative aree e le precipitazioni medie annue del periodo 1993-2006

I singoli termini del bilancio sono stati calcolati con procedure GIS attraverso operazioni di analisi spaziale, con un processo, tra l'altro, riproducibile ed aggiornabile al cambiare dei dati di input (per es. precipitazioni, prelievi, ecc.).

Gli acquiferi alluvionali significativi del bacino del fiume Arno, con i rispettivi termini dell'equazione del bilancio, sono riportati nella tabella a seguire. Per ognuno dei 17 acquiferi è stata inoltre redatta una scheda di sintesi che contiene i termini e i risultati delle elaborazioni di bilancio.

AREA BILANCIO	Mugello	Chiana	Arezzo	Casentino	Valdarno superiore	Pesa	Elsa	Santa Croce	Valdnievole	Bientina	Pianura di Pisa	Lucca	Empoli	Firenze	Prato	Pistoia	Val d' Era
I areale	1430003	3270376	7798526	4867639	3346252	1565386	3500485	1274453	1943239	860000	4244085	10493020	3417640	11264581	10883199	1649571	4039210
V da aree ricarica diretta		14017220									16213401			1314796		9090790	
V ACISS poroso	171088	4594724						13910688		13401766	8944893	8584630	2325572				1372116
V ACISS fratturato	2342966	10960401	5905064						5784670	881887	1504449	3384073		5294605	8813832	7449779	
Av	570556	2009831	851105	2340991	794717	1050600	1019498	622451	2866567	427588	53586	1633093	329742	578651	459243	2647474	398675
I fiumi	1040000				4880000			2430000					1040000	9830000	17180000	18100000	400000
apporti da acquiferi contermini											3150000	5000000	700000				
inf acque irrigue												2000000					
Volume di subalveo prelevato da pozzi	3199280				4686752	4758986	3855442		2264908				8400000	4849204	1237730	10815558	678860
Volume prelievi	3503485	21836452	4204669	2982856	8815448	5027414	5743204	15970291	6611995	14304109	19219190	29750356	11435136	24232102	36973925	39907589	2216230
V prelievo Aciss poroso	654198	423624						764009		7779372	686862	1824925					48510
V prelievo Aciss fratturato	307540	2321229	970560						508815	128780	128000	270264		1818720	816877	400626	0
drenaggio fiumi deflusso sotterraneo	4100000		1020000		2090000			930000					4100000	1080000		4100000	4100000
SALDO	188670	10271248	8359466	4225774	2802273	2347558	2632221	1192372	5738574	-6641020	14076362	-750729	677818	6001014	783202	5344957	524120
SALDO Mmc	0.19	10.27	8.36	4.23	2.80	2.35	2.63	0.57	5.74	-6.64	14.08	-0.75	0.68	6.00	0.78	5.34	0.52
saldo %	3.40	29.50	57.40	58.60	31.10	89.70	58.20	3.10	54.20	-42.60	41.30	-2.40	8.70	21.20	2.10	13.70	8.40
saldo mc/Kmq	14480	17293	99886	130546	71651	117027	57049	6096	58075	-149472	34576	-9574	15557	34845	9110	45223	12335
RICARICA	4592875	32107700	13584135	7208630	9020969	2615986	4519983	17473583	10085661	7663089	33295552	28999627	7812954	26463912	36519397	38536988	6161490
RICARICA Mmc	4.60	32.10	13.60	7.20	9.00	2.60	4.50	17.50	10.10	7.70	33.30	29.00	7.80	26.50	36.50	38.50	6.20
RICARICA / Kmq	352485	54057	162315	222695	230656	130408	97962	185810	102068	172476	81785	369846	179320	153663	424792	326060	145010

Tabella 56 - Bilancio dei 17 acquiferi di pianura del bacino dell'Arno

I areale	infiltrazione areale
V da aree ricarica diretta	infiltrazione areale dalle aree di ricarica diretta
V ACISS poroso	apporto dalle aree di ricarica a permeabilità primaria
V ACISS fratturato	apporto dalle aree di ricarica a permeabilità secondaria
Av	apporti dai versanti
I fiumi	infiltrazione dai fiumi
apporti da acquiferi contermini	apporti da acquiferi confinanti
inf acque irrigue	infiltrazione dalle acque di irrigazione
Volume di subalveo prelevato da pozzi	ricarica di acque superficiali indotta dal prelievo di subalveo
Volume prelievi	prelievi totali sull' acquifero
V prelievo Aciss poroso	prelievi sulle aree di ricarica
V prelievo Aciss fratturato	prelievi sulle aree di ricarica

I bilanci redatti per gli acquiferi significativi del bacino mostrano un saldo negativo solo per due di essi, l'acquifero di Bientina e quello della piana di Lucca.

In particolare nella pianura di Bientina si ha forte saldo negativo, peraltro accompagnato da un abbassamento dei livelli di falda monitorati e da fenomeni di subsidenza che confermano lo stato di sovrasfruttamento dell'acquifero.

Anche il saldo negativo ottenuto per la piana di Lucca, che ricordiamo è un caso particolare, essendo una porzione di un unico acquifero in parte ricompreso nel bacino del fiume Serchio, è confermato dai dati di monitoraggio piezometrico.

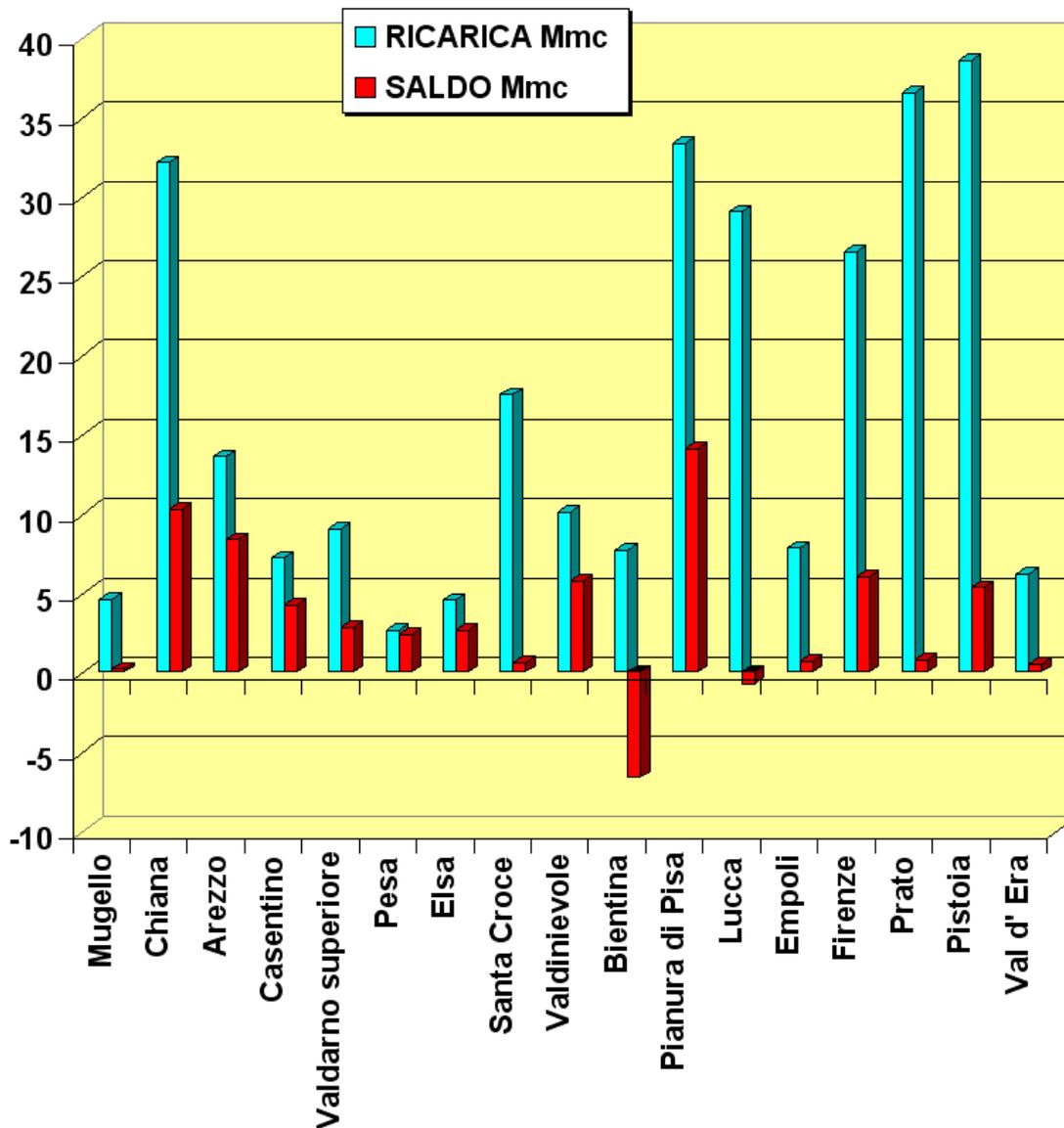


Figura 106 - Confronto saldo – ricarica

Gli altri bilanci risultano tutti positivi.

Risulta altresì importante analizzare e confrontare questo dato con quello della ricarica media annua.

Si può notare, ad esempio, che l'acquifero di Lucca (relativamente alla parte compresa nel bacino dell'Arno) pur risultando con bilancio negativo, ha una ricarica elevata, mentre alcuni degli acquiferi con saldo positivo hanno una capacità di ricarica modesta che comunque ne limita lo sfruttamento.

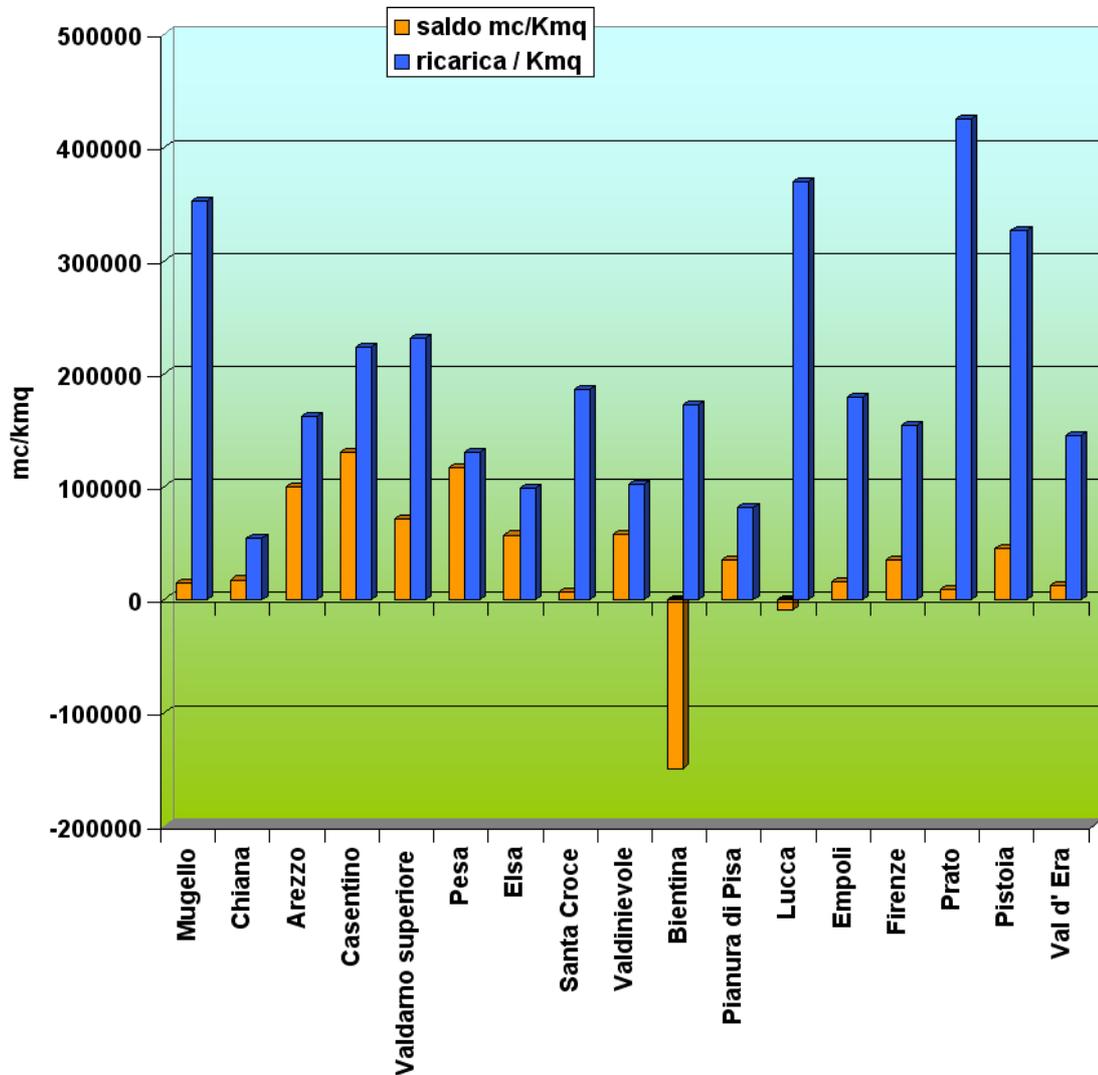


Figura 107 - Confronto "saldo per unità di superficie" con la "ricarica per unità di superficie" espressi in mc/Kmq

Zonazione delle disponibilità di acque sotterranee

Al fine di poter identificare, all'interno degli acquiferi a saldo di bilancio positivo le aree oggetto di maggior sfruttamento, si è ritenuto necessario dettagliare ulteriormente ciascun acquifero in zone con diverse criticità locali. Tali zone sono quelle che, in pratica, presentano forti e persistenti nel tempo abbassamenti della superficie piezometrica, peggioramento della qualità delle acque, fenomeni di subsidenza.

Tali criticità sono essenzialmente legate ad grado di sfruttamento locale della risorsa che non è supportata da una uguale capacità di ricarica e disponibilità idrica.

Le criticità sopra indicate possono essere evidenziate in maniera diretta, mediante lo svolgimento di campagne di misure piezometrica ripetute nel tempo; in tale maniera si registrano le aree caratterizzate da prelievi non consoni alle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero. In mancanza di tali informazioni si è proceduto in via indiretta alla *zonazione della disponibilità di acque sotterranee* dei 17 acquiferi oggetto di bilancio, elaborando i parametri che più condizionano la disponibilità di acque sotterranee, vale a dire prelievi, trasmissività dell'acquifero e ricarica specifica.

Tale processo ha consentito di poter individuare per ogni acquifero le aree omogenee per suscettibilità di criticità idrica e, quindi, ha permesso di stimare e redigere bilanci alla scala locale.

Determinazione del grado di sfruttamento delle acque sotterranee

La procedura per l'individuazione di zone a diversa suscettibilità di criticità idrica ha previsto la creazione di una matrice che incrocia due indicatori, suddivisi in classi, previa produzione, per ogni indicatore, di un tematismo *raster*.

Come indicatori sono stati individuati i *prelievi* in atto e la *trasmissività* dell'acquifero, in quanto il primo esplica la pressione puntuale, e il secondo la capacità di risposta dell'acquifero a tale pressione.

I *prelievi*, che appunto rappresentano le pressioni sull'acquifero; vengono rappresentati come densità di prelievo.

La *trasmissività* è un indicatore basato sui parametri idrogeologici dell'acquifero e rappresenta la produttività dello stesso.

Densità di prelievo

Al fine di evidenziare la distribuzione delle aree con maggiore concentrazione dei volumi idrici emunti è stata effettuata una spazializzazione della densità dei pozzi, pesata in funzione del volume annuo di prelievo assegnato. In particolare è stato creato un *raster* con celle di 50m, dove, ad ogni cella, è assegnato il valore corrispondente alla somma di tutti i volumi annui emunti dai pozzi ricadenti in un intorno circolare della cella stessa con raggio pari a 500 m (tale valore risulta come valore medio di raggio di influenza di un pozzo in acquiferi alluvionali). L'algoritmo utilizzato è quello di Kernel (Silverman B.W., 1986).

La densità di prelievo è quindi stata distinta in quattro classi:

CLASSE	VALORE (mc/anno)
1	< 10.000
2	10.000 – 100.000
3	100.000 – 1.000.000
4	> 1.000.000

Tabella 57 - Classi di valori di densità di prelievo

Se una cella ricade, per esempio, in classe 4, significa che nel suo intorno circolare con raggio di 500 m vengono prelevati più di 1.000.000 mc/anno.

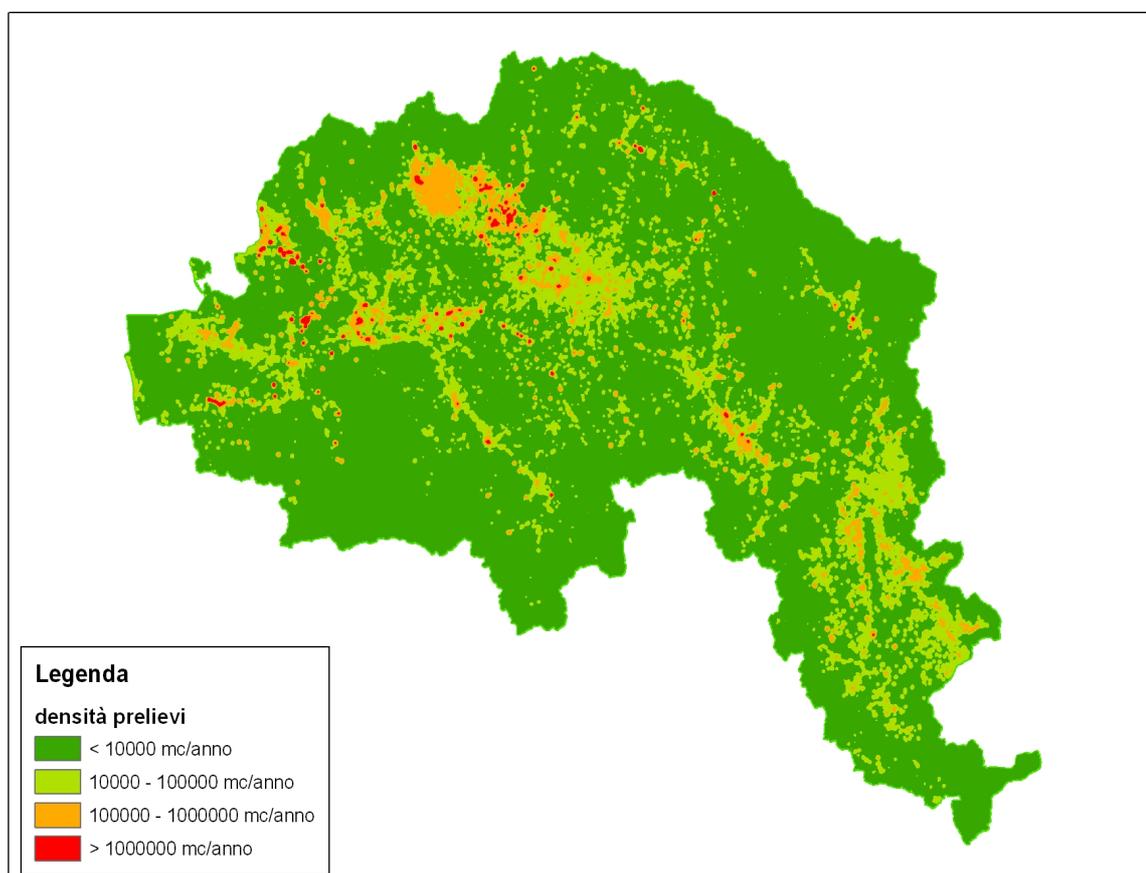


Figura 108 - Densità di prelievo

Trasmissività

Il dato di trasmissività (permeabilità moltiplicato lo spessore dell'acquifero) deriva dalla caratterizzazione tridimensionale dei corpi idrici sotterranei alluvionali, dove tale dato è stato assegnato in funzione dei dati disponibili

I dati di trasmissività derivano da prove di portata per i corpi idrici sotterranei della Valdichiana, di Empoli e di Bientina, per la pianura di Firenze, Prato, Pistoia è disponibile una zonazione della permeabilità da cui, mediante la geometria degli acquiferi, è stata calcolata la trasmissività.

Per tutti gli altri acquiferi la trasmissività è stata calcolata dalla relazione

$$T = K * H$$

assegnando il valore di permeabilità sia mediante dati di bibliografia, sia dalle informazioni contenute nelle documentazioni tecniche a supporto delle richieste di concessioni idriche trasmesse all'Autorità.

Mediante la spazializzazione dei dati, è stata realizzata la carta della trasmissività in formato raster, in cui sono state distinte le seguenti classi:

CLASSE	VALORE (mq/sec)
10	$< 10^{-4}$
20	$10^{-4} - 10^{-3}$
30	$10^{-3} - 10^{-2}$
40	$> 10^{-2}$

Tabella 58 - Classi di valori di trasmissività

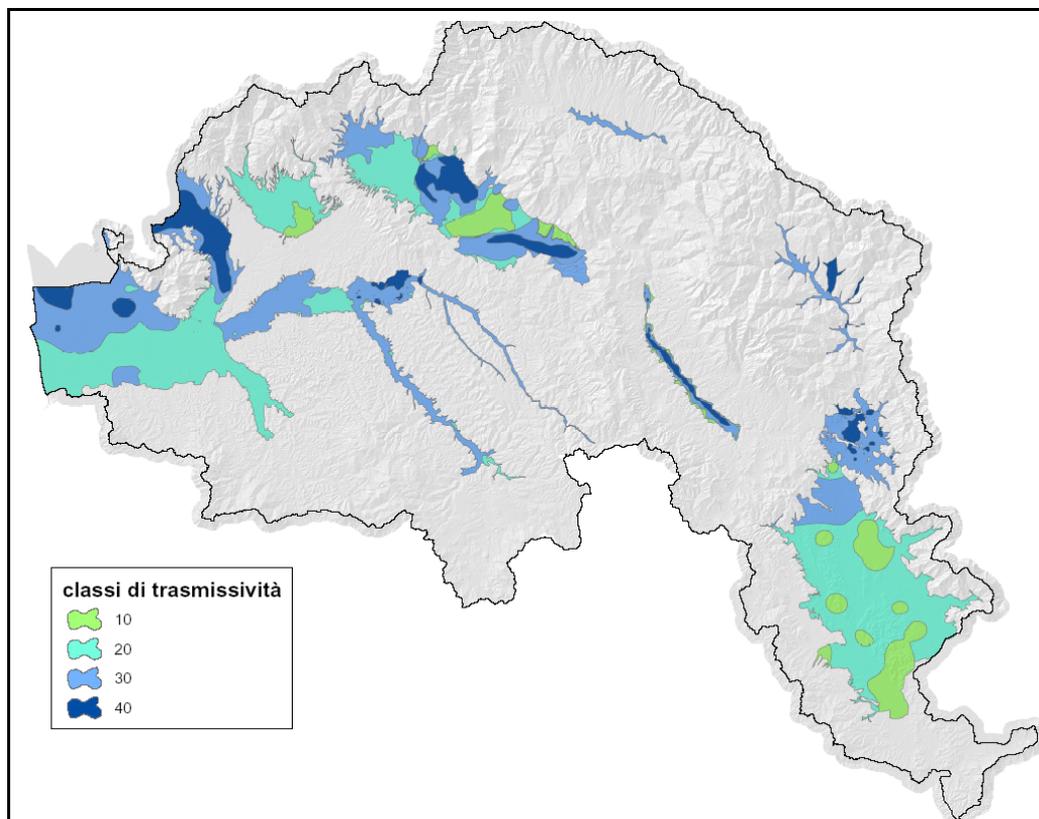


Figura 109 - Carta delle classi di trasmissività

Zone a diversa suscettibilità di criticità idrica

I tematismi relativi alla trasmissività e densità di prelievo sono stati incrociati attraverso la seguente matrice:

		DENSITÀ DI PRELIEVO			
		1	2	3	4
TRASMISSIVITÀ	10	2	3	4	4
	20	1	3	3	4
	30	1	2	3	4
	40	1	2	3	4

Tabella 59 – Matrice di contingenza della trasmissività

Il risultato è una carta in cui l'acquifero risulta suddiviso in quattro classi di criticità, che vanno dalla classe 4 (criticità elevata), alla classe 1 (criticità bassa).

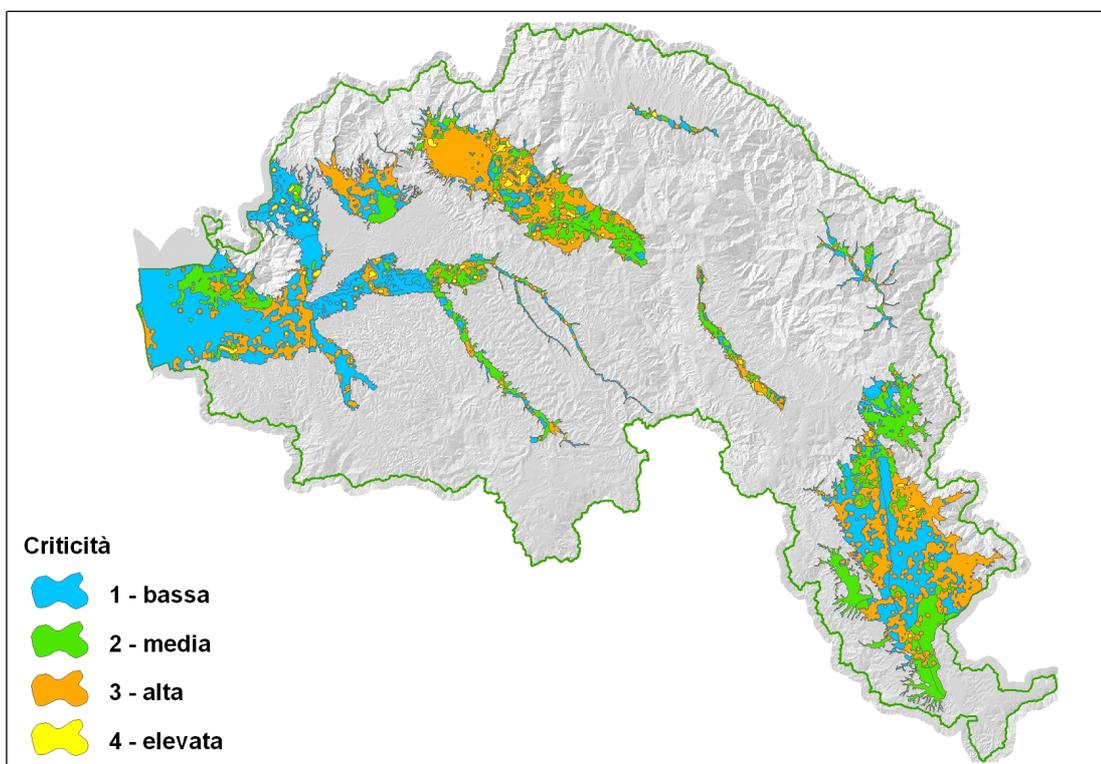


Figura 110 - Carta delle aree a diversa criticità dovute al grado di sfruttamento

La distribuzione spaziale così ottenuta appare coerente con quella delle zone che effettivamente, da indagini di campagna, hanno mostrato nel tempo episodi di abbassamenti piezometrici o formazioni di ampi coni di depressione piezometrica della falda.

Zonazione delle disponibilità di acque sotterranee (ZoDIAS)

Una volta determinata la criticità si è proceduto alla stima della ricarica unitaria per ogni acquifero espressa in mc per unità di superficie.

Il valore di ricarica di ogni singolo acquifero è stato distribuito sulla sua proiezione in superficie tenendo in considerazione, laddove era possibile in conseguenza dei dati disponibili, le caratteristiche delle diverse aree di alimentazione. Per una trattazione di dettaglio del metodo adottato si rimanda alle schede di ogni singolo acquifero.

Per ognuna delle singole aree a diversa suscettibilità di criticità idrica viene calcolata la somma de prelievi che vi insistono e confrontata con la ricarica assegnata ottenendo quindi il bilancio delle disponibilità idriche residue:

$$\text{Bilancio} = \text{Ricarica} - \text{Prelievi}$$

Le zone a diverso grado di disponibilità residua di acqua sotterranea sono state classificate come segue:

Classe	Valori (mc/ha)
D 4	< -10.000
D 3	-10.000- -1.000
D 2	-1.000 - 500
D 1	500 - 5.000

Tabella 60 – Classi di disponibilità residua

La *ZoDIAS* offre indicazioni sulla disponibilità idrica all'interno dell'acquifero. Precisando ulteriormente, il significato delle classi è il seguente.

Classe D1 – aree dove la ricarica media su unità di superficie copre ampiamente o comunque in maniera sufficiente i prelievi in atto. In queste aree nuovi prelievi non creano nessun disequilibrio al bilancio idrico, se a livello complessivo l'acquifero risulta in saldo di pareggio o positivo.

Classe D2 – aree dove la ricarica media su unità di superficie copre in maniera sufficiente i prelievi, in queste aree le disponibilità sono prossime al pareggio (limite dell'equilibrio) e nuovi prelievi potrebbero creare disequilibri anche livello di area complessiva.

Classi D3 e D4 – aree dove il disavanzo fra la ricarica media su unità di superficie e i prelievi risulta elevata (classe 3) o molto elevata (classe 4). In tali aree i nuovi prelievi creano un disequilibrio tale che potrebbe portare alla formazione di approfondimenti

della superficie piezometrica, laddove non ci siano apporti ulteriori di ricarica (es: fronti di alimentazione come i fiumi).

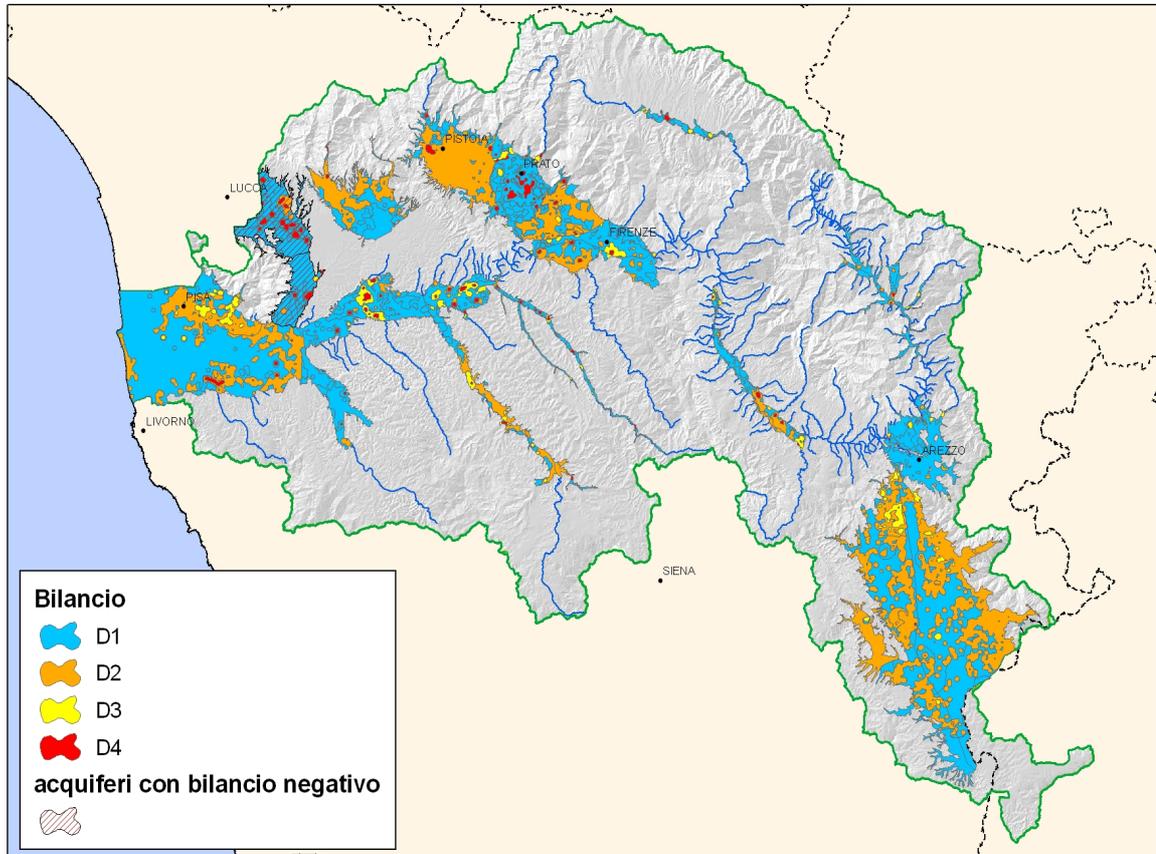


Figura 111 - Zonazione delle disponibilità idriche di acque sotterranee negli acquiferi di pianura oggetto di bilancio

La zonazione permette di evidenziare quelle aree, che pur essendo comprese in acquiferi a bilancio positivo, presentano zone soggette a forte sfruttamento. Vengono messe altresì in evidenza le aree in cui il disavanzo è tale da mettere in discussione la futura sostenibilità del regime degli emungimenti. In tali aree l'effettiva disponibilità deve essere acclarata sia con studi di dettaglio che con il monitoraggio piezometrico delle falde interessate.

In conclusione, si riporta uno schema che sintetizza la procedura adottata per la redazione dei bilanci idrici sotterranei e la conseguente zonazione e validazione dei dati. Dallo schema emerge inoltre la dinamicità del *bilancio*, che impone quindi dei processi continui di aggiornamento e verifica dei dati, soprattutto tramite monitoraggi.

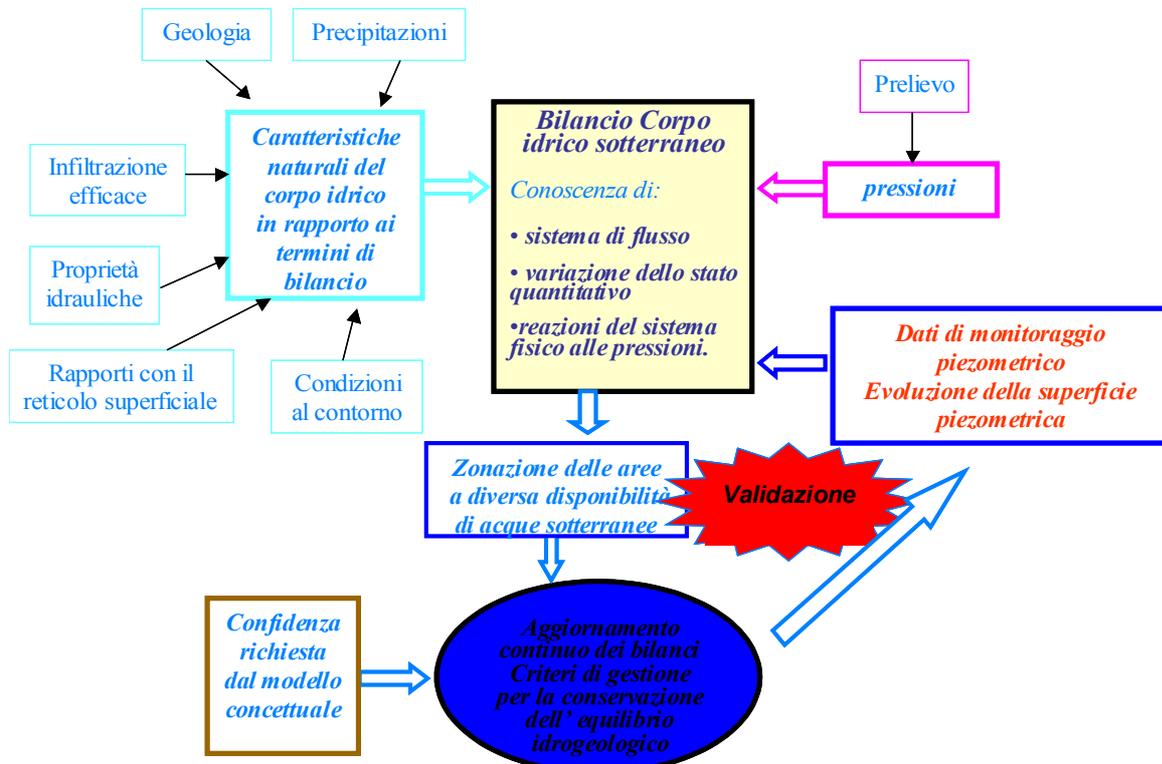


Figura 112 - Schema del procedimento iterativo per l'implementazione del bilancio dei corpi idrici sotterranei

Aree a rischio di salinizzazione

La salinizzazione, spesso conseguenza di eccessivi o scorretti emungimenti, è una problematica che interessa, in maniera più o meno accentuata, gli acquiferi delle pianure costiere toscane.

Per quanto riguarda il bacino dell'Arno, anche in considerazione che l'area costiera di riferimento è in buona parte sede di un sito di importanza comunitaria e comunque per valutare l'entità del fenomeno, si è ritenuto necessario procedere ad un approfondimento conoscitivo ed alla successiva individuazione cartografica di possibili aree a rischio di salinizzazione delle falde.

Tale approfondimento ha riguardato l'acquifero confinato costiero della falda profonda in ghiaia della Pianura di Pisa, impostato ad una profondità compresa tra i 40/60 metri nel suo lembo meridionale fino ad arrivare fin oltre i 150 m nel quadrante nord occidentale, per un'estensione, all'interno dell'acquifero di cui sopra, di circa 200 Km².

L'acquifero, mentre nell'entroterra pisano è caratterizzato da un gran numero di prelievi ad usi vari, dal potabile, all'industriale, all'irriguo, nella fascia costiera è interessato da prelievi numericamente modesti e per lo più ad uso irriguo, anche se consistenti in termini volumetrici. Discorso diverso vale per l'acquifero superficiale presente nella stessa area, peraltro non oggetto di bilancio, caratterizzato da numerosi prelievi (ad esempio quelli a servizio delle attività balneari o ad uso domestico) ma di entità assai modesta.

Le necessarie indagini e studi prodotti sono stati svolti in sinergia con le altre autorità competenti in materia di gestione della risorsa idrica. In particolare sono stati utilizzati i risultati di una tesi di laurea, appositamente assegnata in collaborazione con l'Università degli studi di Firenze e conclusasi nel corso dell'anno 2009, relativa allo studio idro-geochimico dell'acquifero confinato in ghiaia. La tesi si basa sui risultati di due campagne di misura, svolte nel settembre 2008 e nel gennaio 2009 relative a dati piezometrici e chimici su pozzi (in numero di 59) preventivamente selezionati dagli archivi della Provincia di Pisa e dell'Autorità di bacino in funzione della loro posizione, delle stratigrafie disponibili nonché delle caratteristiche costruttive del pozzo stesso.

Sono inoltre stati acquisiti i dati relativi al recente articolo *“Studio multidisciplinare idrogeologico-geochimico dell'acquifero confinato in ghiaie nella fascia costiera pisana tra il Fiume Arno ed il Canale Scolmatore (Toscana)”* di Butteri M., Doveri M., Gianecchini R. e Gattai P. (“in stampa” su Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, Vol.90.) e consultati i vari lavori effettuati nel corso degli ultimi anni ed elencati in bibliografia.

L'esame degli studi di cui sopra individua, all'interno dell'acquifero, un'area a maggior criticità nella zona sud ovest dell'acquifero, posta all'altezza della località Calambrone.

La caratterizzazione geochemica delle acque

Le indagini di carattere idro-geochimico effettuate per la redazione della tesi di laurea sopra richiamata e finalizzate a verificare la presenza di acqua di origine marina nella falda, indicano che l'acquifero oggetto di studio è costituito da un sistema idrogeologico assai complesso, le cui acque derivano dal miscelamento di almeno tre tipi di acque caratterizzati da idrochimismo diverso:

1. acque a componente $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ di origine meteorica, che entrano nel sistema dell'acquifero dai rilievi montuosi presenti ai margini della pianura di Pisa dopo aver lisciviato rocce carbonatiche;
2. acque a componente $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$, provenienti da un complesso sistema di circolazione idrico sotterraneo di fluidi caldi all'interno di formazioni del basamento Mesozoico;
3. acque clorurato-alcaline ricche in $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$, derivanti da acque meteoriche con significativo contributo di origine marina.

Nella figura a seguire sono localizzate le aree con acque a diverso chimismo.

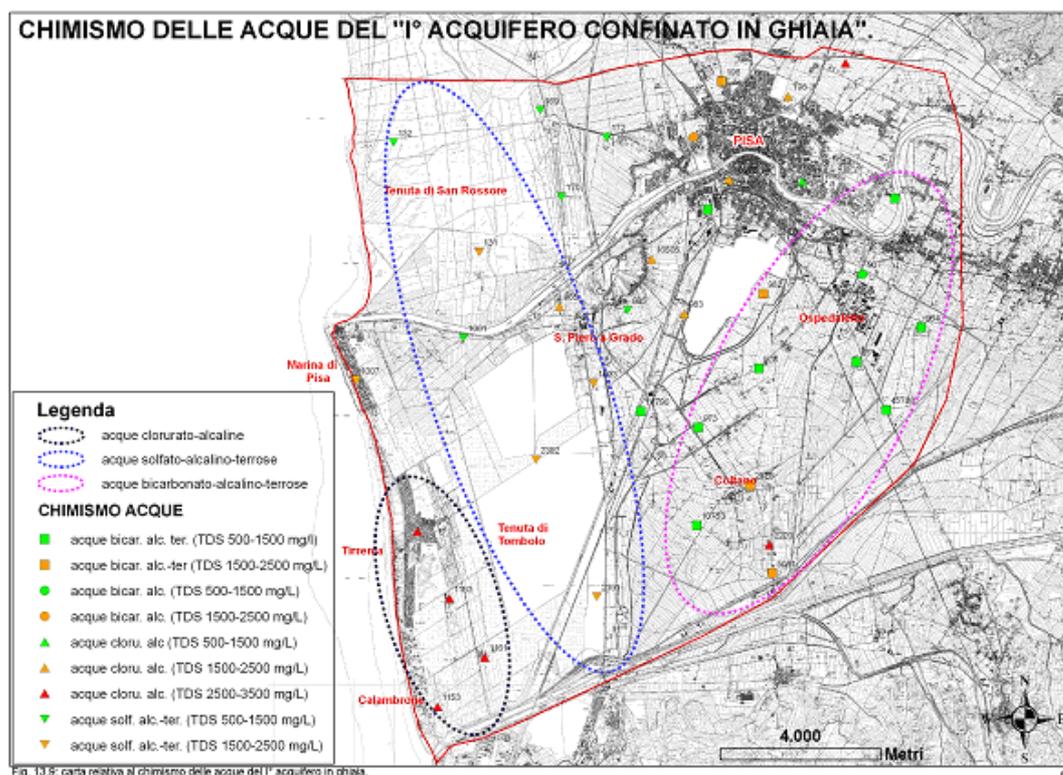


Figura 113 –chimismo delle acque del primo acquifero in ghiaia

La cartografia mostra sostanzialmente l'individuazione di tre zone ben distinte, caratterizzate da acque con diversa composizione. Naturalmente la suddivisione effettiva non è così netta. Proprio per la notevole complessità strutturale dell'acquifero in ghiaia, si evidenziano sotto zone in cui le acque sono costituite sostanzialmente da

un miscelamento di componenti di diversa origine, come risulta in particolare l'area urbana di Pisa.

Dall'esame della cartografia emerge che le acque con composizione bicarbonato-alcalino-terrosa sono localizzate nella zona sud-orientale della Pianura. Questa disposizione dipende probabilmente dal fatto che in tale area l'acquifero ha una buona continuità areale e il tipo di chimismo è riconducibile ad una miscelazione tra acque di origine meteorica e acque provenienti da lisciviazione di carbonati presenti nel sottosuolo delle limitrofe Colline pisano-livornesi. È inoltre da notare che in questa zona la falda in ghiaia si differenzia dalla più tipica successione dell'Acquifero Multistrato Confinato (Amc) comprendente due principali livelli acquiferi. Su questa trasversale l'acquifero viene infatti direttamente sormontato dai terreni semipermeabili appartenenti alle "Sabbie e Limi di Vicarello" (Pleistocene sup.) che quindi funzionano da aree di ricarica, permettendo scambi tra l'acquifero e formazioni con componenti carbonatiche della zona. Inoltre è stato messo in evidenza come i depositi dunari più antichi (Coltano, Castagnolo e Palazzetto), essendo aree di infiltrazione con alta permeabilità, alimentino in parte, attraverso una ricarica diretta, l'acquifero in ghiaia.

Le acque a componente solfato-alcalino-terrosa, individuate in una fascia orientata N-S tra la linea costiera e l'entroterra di San Piero a Grado-Coltano, provengono da circolazione profonda di acque termali ed entrano all'interno dell'acquifero risalendo da faglie e sistemi tettonici minori orientati in direzione N-S presenti nella Pianura di Pisa (Grassi e Cortecci, 2005). Tale risalita è possibile in quanto la tettonica distensiva legata a questo sistema di faglie disloca i vari livelli stratigrafici, mettendo a contatto litologie permeabili che consentono la circolazione di fluidi; è inoltre possibile che tali fratturazioni creino nel sottosuolo discontinuità secondarie che possono permettere l'infiltrazione di acque.

Infine, e a conferma delle informazioni e studi già disponibili, le acque di falda della porzione di acquifero corrispondente all'area costiera meridionale, nella zona di Tirrenia-Calambrone, presentano una composizione clorurato-alcalina di chiara origine marina. Tale situazione può essere stata aggravata dagli intensi e localizzati emungimenti presenti nell'area, come risulta evidente dalla carta piezometrica relativa al settembre 2008.

Infine, l'origine del chimismo di alcuni pozzi (individuati in cartografia con i numeri 10875, 16505, 965), ubicati parallelamente al corso del fiume Arno, sembra essere legata a possibili interconnessioni, accompagnata da fenomeni di lenta percolazione, esistenti tra l'acquifero profondo e gli orizzonti superficiali direttamente a contatto con il fiume, il quale, come evidenziato in letteratura (Ghezzi et al., 1994; Grassi, Rossi, 1996; Cortecci et al., 2002), specialmente durante i periodi di magra è affetto da una marcata intrusione salina fino a circa 23 Km dalla foce.

Per il pozzo 226, e più limitatamente per il pozzo 198, è stato invece ipotizzato un miscelamento tra acque connate ed acque di circolazione superficiale provenienti dalle conoidi alluvionali presenti ai margini dei Monti Pisani.

Non è infine da escludere che possa sussistere un contributo di tipo antropico che si evidenzia in particolar modo nel pozzo 2220 (Coltano).

Per concludere si evidenzia come le analisi geochimiche effettuate confermano che l'intrusione di acqua marina si verifica in maniera evidente solo nella zona meridionale della pianura di Pisa, nei pressi di Tirrenia e Calambrone e limitatamente in una stretta fascia parallela all'Arno a Sud-Ovest di Pisa.

La Cartografia di Piano

I risultati e la sintesi degli studi e indagini sopra richiamati sono stati riportati in una specifica cartografia che suddivide l'acquifero in zone diversamente caratterizzate, cartografia redatta tenendo conto della composizione delle acque sopra riportata e delle piezometrie e del quadro generale delle informazioni disponibili.

L'andamento piezometrico del settembre 2009 mostra un lieve gradiente dal mare verso l'entroterra (di verso opposto rispetto a quello che dovrebbe avere naturalmente) e alcune zone, nell'entroterra, contraddistinte da significative depressioni, evidentemente dovute a forti emungimenti.

Peraltro da un confronto con piezometrie dell'area risalenti ai primi anni novanta risulta che la situazione non è sensibilmente mutata, con l'eccezione della zona di Tirrenia – Calambrone, ove in passato non erano evidenziate importanti depressioni.

In tale zona i prelievi in atto inducono oggi depressioni notevoli, fino a – 12.0 m dal p.c.. Il rilievo del livello piezometrico statico di settembre 2009 (rappresentativo della situazione di magra della falda riportata in figura), mostra un massimo di depressione al centro dell'area, proprio in corrispondenza di alcuni grossi prelievi. I livelli piezometrici pseudo statici oscillano fra i – 0.5 m a – 2.7 m da p.c., mentre i livelli dinamici raggiungono i 10/12 m di depressione. La zona peraltro è probabilmente caratterizzata da una struttura e da una geologia che favoriscono l'ingressione di acque salate (fra l'altro il tetto dell'acquifero risulta meno profondo rispetto a quello della porzione nord dell'acquifero).

Anche al fine di individuare dei criteri gestionali calibrati sul quadro conoscitivo, la porzione di pianura oggetto di studio, in funzione dei dati sopra richiamati e disponibili, è stata suddivisa in tre distinte zone:

la **zona IS1** - (Tirrenia -Calambrone), già interessata da ingressione salina;

la **zona IS2** - parallela alla linea di costa, da considerarsi di "attenzione", sia per la vicinanza dal mare, che per la presenza di emungimenti che intercettano il naturale flusso di acqua dolce verso il mare, comportando una diminuzione dell'azione di contrasto del flusso di acqua dolce contro il cuneo di ingressione salina;

la **zona IS3** – ulteriore zona di attenzione, anche in funzione dei livelli piezometrici riscontrati, che comprende l'entroterra della pianura, dove il sistema dei prelievi, assai rilevante, intercetta parte del flusso che naturalmente andrebbe a mare, contrastando la spinta di acqua salata.

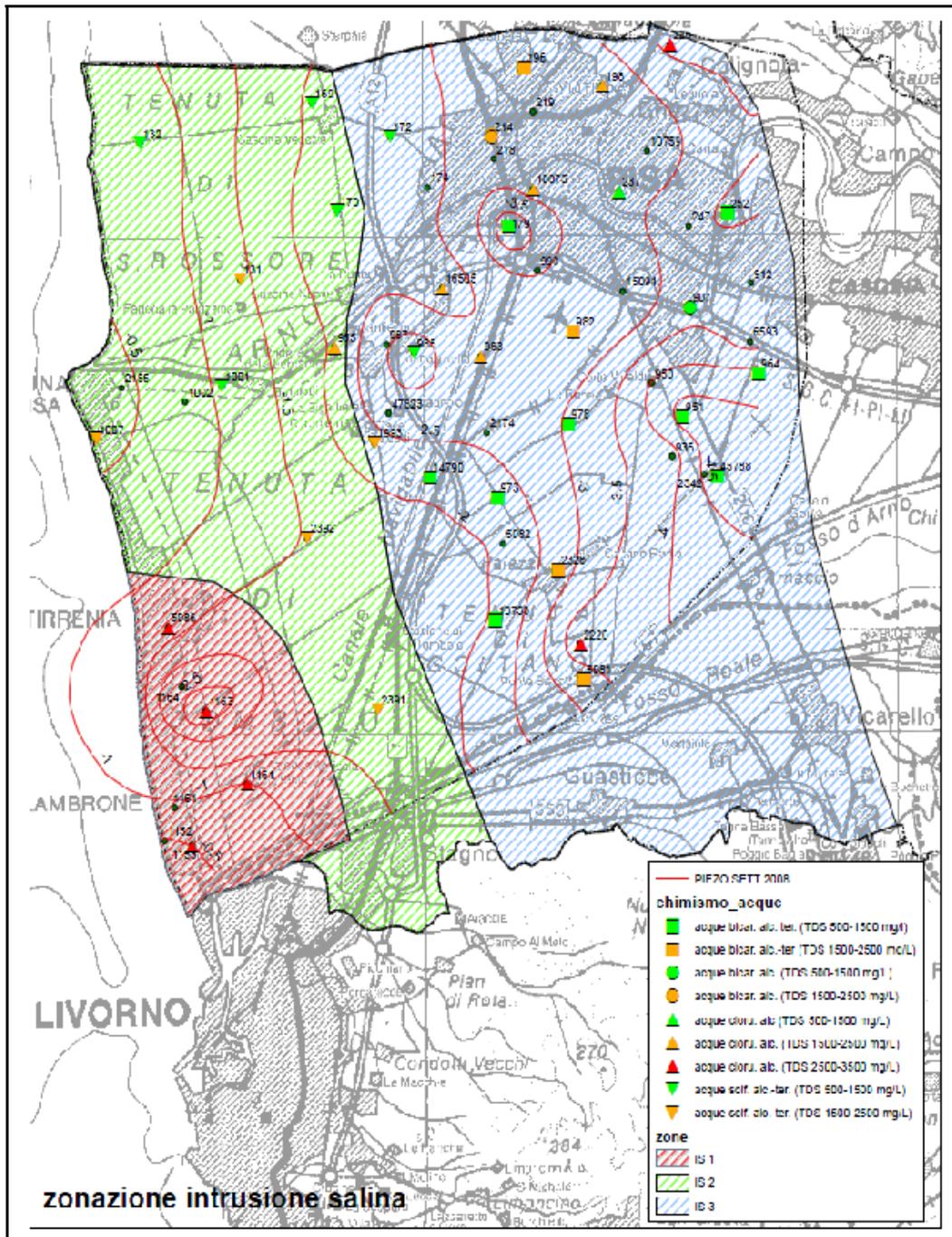


Figura 114 - zonazione intrusione salina

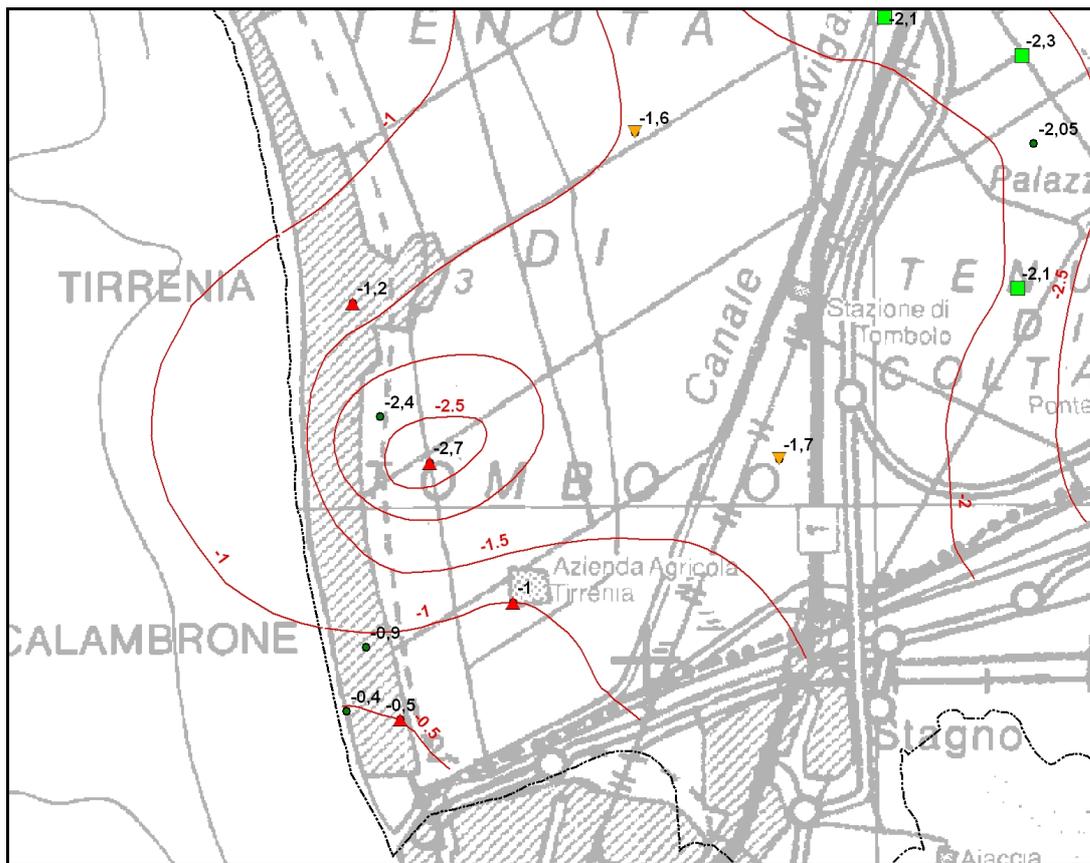


Figura 115 - Piezometria pseudo – statica dell'area IS1 (Settembre 2009)