



1506
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI URBINO
CARLO BO

DIPARTIMENTO DI SCIENZE PURE E APPLICATE

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DI BASE E APPLICAZIONI

CURRICULUM: **SCIENZE DELLA TERRA**

CICLO: XXX

Settore Scientifico Disciplinare: GEO/05

PROPOSTA DI UNA NUOVA METODOLOGIA SU BASE FENOLOGICA PER LA
VALUTAZIONE DEL BILANCIO IDROGEOLOGICO GIORNALIERO DI BACINO:
CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO ATTRAVERSO MISURE
SPERIMENTALI NEL MEDIO E ALTO BACINO DEL FIUME METAURO

RELATORE

Chiar.mo Prof. Francesco Veneri

DOTTORANDO

Dott. Michele Bartolucci

ANNO ACCADEMICO 2016-2017

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare vivamente quanti hanno reso possibile il completamento dello studio di dottorato, in particolare il prof. Francesco Veneri che mi ha seguito con pazienza e competenza durante tutto il mio percorso di studi universitari. Inoltre vorrei ringraziare:

I dottori Piero Paolucci e Silvio Cecchini dell'Osservatorio Meteorologico "A. Serpieri" di Urbino;

il dott. Federico Biagiotti;

La dott.ssa Tiziana Paciaroni dell'Unione Montana "Alta Valle del Metauro";

I dottori Roberto Imperato e Alessandro di Paola del Comune di Urbino, settore Edilizia;

I dottori Sauro Teodori e Giulio Pappafico dell'Università degli studi di Urbino "Carlo Bo";

Il dott. Daniele Farina;

I dottori Paolo Olivo, Daniela Iervolino, Federica Lippi, Andrea Cicogna della Regione Friuli Venezia Giulia, Direzione Centrale Ambiente ed Energia

... e quanti altri mi hanno aiutato.

Infine un pensiero va ai miei familiari, Maddalena, Luciana, Daniele, che mi hanno supportato in questi anni.

[.....]

LAUDATO SI', MI' SIGNORE,

PER SOR'ACQUA

LA QUALE E' MOLTO UTILE

ET HUMILE ET PRETIOSA ET CASTA.

[.....]

(San Francesco, "Cantico delle Creature", 1224 circa)

INDICE GENERALE

Nota: per la versione pdf l'indice è **cliccabile** e sono presenti segnalibri

Gli indici relativi a tabelle, figure ed equazioni sono riportati dopo l'appendice

CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE	p.1
1.1 Premessa: la necessità di accurate stime della risorsa idrica	p.1
1.1.1 Cenni sul trend climatico e delle precipitazioni a livello globale	p.1
1.1.2 Cenni sul trend climatico e delle precipitazioni nella Regione Marche e nella Provincia di Pesaro e Urbino	p.1
1.1.3 Cenni sul trend dei deflussi nella provincia di Pesaro e Urbino	p.2
1.2 Obiettivi della ricerca e cenni metodologici	p.3
1.3 Metodologia step by step per il calcolo di bilancio	p.5
1.4 Strumenti	p.6
1.5 Provenienza dei dati di base e parametri del bilancio in cui sono utilizzati	p.6
CAPITOLO 2 - LE AREE DI STUDIO	p.9
2.1 Il bacino del Fosso di Santa Maria degli Angeli	p.9
2.1.1 Le caratteristiche del bacino "intero": fisiografia, ordine del bacino, superfici altimetriche, esposizione, pendenza	p.9
2.1.2 Le caratteristiche del bacino "ridotto": fisiografia, geologia, depositi quaternari	p.17
2.2 Il bacino del medio-alto Fiume Metauro	p.21
2.2.1 Affluenti, ordine del bacino, classi di pendenza ed esposizione, fasce altimetriche e curva ipsografica	p.21
2.2.2 Comparazione delle caratteristiche dei territori dei bacini medio-alto Metauro e Santa Maria degli Angeli	p.26
CAPITOLO 3 - ANALISI DELL'USO DEL SUOLO NEL BACINO SANTA MARIA DEGLI ANGELI	p.33
3.1 Differenza tra "land use" e "land cover"	p.33
3.2 Le carte di uso del suolo realizzate	p.33
3.3 Descrizione delle classi di uso del suolo	p.34
3.4 Componenti delle classi di uso del suolo e superfici delle classi/componenti negli anni di bilancio 2013, 2014, 2015 e 2016	p.38
3.5 Analisi delle variazioni di uso del suolo attraverso le carte 1955-1997-2013	p.40
CAPITOLO 4 - IL BILANCIO IDROGEOLOGICO SU BASE FENOLOGICA	p.47
4.1 Generalità sul ciclo idrogeologico	p.47
4.2 Equazione "classica" di bilancio idrogeologico	p.49
4.2.1 Il bilancio annuale	p.49
4.2.2 Il bilancio pluriennale	p.50
4.3 Il bilancio idrogeologico giornaliero su base fenologica	p.50
4.3.1 Limiti dell'approccio tradizionale al bilancio idrogeologico	p.50
4.3.2 I principi e i parametri del bilancio: modello concettuale e bilancio idrologico del suolo	p.51
4.3.3 Esempio di applicazione del bilancio: analisi di 6 periodi significativi dell'anno 2014	p.53
4.3.4 Equazione finale del bilancio idrogeologico su base fenologica	p.59
4.3.5 Significato della variazione della riserva idrica del suolo ΔR	p.61
4.3.6 Nota sugli apporti esterni al bacino	p.62
4.4 Cenni su altri modelli concettuali di stima della evapotraspirazione reale: Budyko framework	p.62
4.4.1 Budyko curve e miglioramenti successivi	p.62
4.4.2 Applicazione dell'equazione di Zhang (2001) agli anni di bilancio e confronto con la ETcR calcolata con il bilancio fenologico	p.65

CAPITOLO 5 - STIMA E ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI E DELLA EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE (ETO) E CORREZIONE CON IL COEFFICIENTE DI ACCLIVITA'	p.66
5.1 Il coefficiente di acclività	p.66
5.2 Fonti dei dati per le precipitazioni e per l'evapotraspirazione potenziale	p.67
5.3 Stima della evapotraspirazione potenziale con il metodo Penman Monteith	p.68
5.4 Utilizzo della regressione quota-precipitazioni e delle fasce altimetriche per la stima delle precipitazioni mensili nel bacino medio-alto Metauro	p.71
5.5 Valori e andamento delle precipitazioni e della ETO nel bacino SMA negli anni di bilancio – confronto con le medie 1960-2003 di Urbino	p.74
CAPITOLO 6 – L'EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE CULTURALE (ETc) NEL BACINO	p.78
6.1 Il quaderno FAO n°56 e i principi della evapotraspirazione colturale	p.78
6.2 I coefficienti colturali	p.80
6.2.1 Single crop coefficient o double crop coefficient?	p.80
6.2.2 I Kc delle fasi fenologiche	p.81
6.2.3 I coefficienti proporzionali della fase di sviluppo e della fase finale	p.82
6.2.4 La correzione climatica dei coefficienti	p.82
6.3 Il coefficiente da terreno nudo	p.84
6.4 I coefficienti colturali di alcune delle componenti di uso del suolo	p.89
6.4.1 Riassunto sulle classi e componenti di uso del suolo	p.89
6.4.2 Il calcolo del Kc per l'erba medica (alfalfa)	p.91
6.4.3 Il calcolo dei Kc per i terreni a riposo ed avena selvatica/menta selvatica	p.92
6.4.4 Il calcolo del Kc per le ginestre (spartium junceum)	p.93
6.4.5 Il calcolo del Kc per gli arbusti/piccoli alberi	p.94
6.4.6 Il calcolo del Kc per gli alberi	p.95
6.5 Durata delle fasi fenologiche e valori dei coefficienti colturali delle componenti di uso del suolo nei 4 anni di bilancio	p.98
6.6 Metodologia: esempio di calcolo del coefficiente unico di bacino (Kc bac) a partire dei coefficienti delle componenti e delle classi di uso del suolo	p.103
6.7 Grafici: andamento annuale dei Kc delle classi di uso del suolo e del Kc bacino	p.105
6.7.1 Andamento giornaliero dei Kc delle singole classi di uso del suolo	p.105
6.7.2 Andamento mensile del Kc bacino nei 4 anni di bilancio	p.109
CAPITOLO 7 - IL RUSCELLAMENTO	p.112
7.1 Il metodo del curve number "tradizionale"	p.112
7.2 Il metodo del curve number "in continuo": applicazione al caso di studio	p.115
7.2.1 Limiti AMC su basi fenologiche	p.115
7.2.2 Calcolo dei valori di CN nei 4 anni di bilancio	p.120
7.2.3 L'equazione di Williams per il calcolo del ruscellamento in continuo	p.125
7.2.4 Stima del parametro B dell'equazione di Williams	p.126
7.2.5 Calcolo del ruscellamento CN step by step	p.127
CAPITOLO 8 - LA RISERVA IDRICA DEI SUOLI, IL COEFFICIENTE DA STRESS IDRICO E LA EVAPOTRASPIRAZIONE REALE	p.131
8.1 La riserva idrica dei suoli	p.131
8.1.1 La riserva idrica totale del suolo (TW)	p.131
8.1.2 La riserva idrica disponibile del suolo (TAW), la riserva idrica facilmente disponibile del suolo (RAW), il coefficiente p, il coefficiente da stress idrico Ks, la ETcR	p.132
8.2 Calcolo della riserva idrica e del parametro p nei 4 anni di bilancio	p.134
8.2.2 Il rilevamento ASSAM 2003: profilo di suolo	p.134
8.2.3 Calcolo di un valore unico di riserva idrica per il bacino nei 4 anni di bilancio	p.135

CAPITOLO 9 - LA MISURA DELLE PORTATE E IL CALCOLO DEL DEFLUSSO DI BASE	p.139
9.1 Metodologia nell'esecuzione delle misure delle portate	p.139
9.1.1 Il deflusso di base	p.139
9.1.2 La misura delle portate	p.140
9.1.3 Due modalità di misurazione delle velocità: con mulinello e con galleggiante	p.142
9.1.4 I siti di misura delle portate nei due bacini	p.145
9.1 Afflussi esterni: depuratore delle Conce	p.148
9.3 Calcolo dei deflussi	p.149
9.3.1 Calcolo dei deflussi di base a partire dalle misure di portata	p.149
9.3.2 Confronto dei deflussi annuali misurati con il deflusso calcolato con il metodo di Kennessey	p.150
9.4 Confronto tra Fosso Santa degli Angeli e Fiume medio-alto Metauro	p.154
9.4.1 Misura delle portate	p.154
9.4.2 Curve di deflusso	p.156
9.5 Le relazioni idrauliche	p.160
CAPITOLO 10 - CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL BILANCIO CON ANALISI DEI RISULTATI	p.163
10.1 Calibrazione e validazione del bilancio	p.163
10.1.1 Metodologia di calibrazione e validazione	p.163
10.1.2 Il monitoraggio delle falde acquifere come ausilio per la validazione	p.164
10.1.3 L'infiltrazione efficace: calcolo e confronto con la percolazione profonda	p.167
10.2 Analisi dei risultati e della calibrazione/validazione	p.170
10.2.1 Riepilogo di tutti i valori mensili, calcolati e misurati	p.170
10.2.2 Riepilogo dei valori annuali del bilancio e del deflusso di base	p.172
10.2.3 Confronto tra percolazione profonda e deflusso di base misurato	p.173
10.2.4 Confronto tra percolazione profonda e la variazione delle falde acquifere	p.174
10.2.5 Confronto tra percolazione profonda, ruscellamento e riserva idrica del suolo	p.177
10.2.6 Confronto tra ruscellamento e deflusso di base misurato	p.178
10.3 Il deficit idrico di bacino	p.179
CONCLUSIONI	p.182
APPENDICE: VALORI DI PORTATA DEL FOSSO SANTA MARIA DEGLI ANGELI E DEL MEDIO-ALTO FIUME METAURO – AGOSTO2015-AGOSTO2017	p.185
INDICI SECONDARI	
Indice delle figure	p. 188
Indice delle tabelle	p. 192
Indice delle equazioni	p. 194
BIBLIOGRAFIA	p. 196

1.1 – PREMESSA: LA NECESSITA' DI UN'ACCURATA STIMA DELLE RISORSE IDRICHE

1.1.1 – Cenni sul trend climatico e delle precipitazioni a livello globale

L'acqua dolce è la più importante risorsa per gli esseri viventi: meno dell'1% del totale di acqua nel mondo (la quota presente in laghi e fiumi) è facilmente utilizzabile (pmm.nasa.gov). L'acqua viene utilizzata per innumerevoli scopi: potabile, altri usi domestici, irrigazione, produzione di energia, processi industriali ecc.; è una risorsa rinnovabile ma la sua corretta gestione è fondamentale per il mantenimento del benessere sociale ed economico e la conoscenza dei processi idrologici è indispensabile per la prevenzione del pericolo e rischio idrogeologico (frane, alluvioni).

La temperatura media della Terra è incrementata di circa 0,61°C (5-95% intervallo di confidenza: da 0,55 a 0,67) dal periodo 1850-1900 al periodo 1986-2005 e, in funzione di diversi scenari, potrebbe salire ulteriormente di 0,5-4,0 °C (relativamente alla temperatura media 1986-2005) per il periodo 2081-2100 (WGII summary for policymakers, IPCC 2014). Per ogni grado di riscaldamento globale si stima che circa il 7% della popolazione mondiale possa essere esposta a una diminuzione delle risorse di acqua di almeno il 20% (media di numerosi modelli) (WGII freshwater, IPCC 2014, Schewe et al, 2013). Sebbene gli impatti del cambiamento climatico sulla disponibilità di risorse idriche presentino una notevole variabilità spaziale a seconda dei modelli climatici considerati ma anche in base ai futuri scenari di distribuzione delle piogge, c'è una forte concordanza nelle proiezioni riguardo a una ridotta disponibilità sulle aree del Mediterraneo e in parti dell'Africa meridionale (WGII freshwater, IPCC 2014, sulla base di numerosi studi). Giannakopoulos et al., (2005) stimano che un aumento della temperatura media annuale globale di 2°C porterebbe nel periodo 2030-2060, nella regione del Mediterraneo, un aumento di temperatura da 1 a 3°C, in particolar modo nelle regioni interne, nel periodo estivo e nei paesi più meridionali; se associata ad un calo delle precipitazioni, si ridurrebbe fortemente la disponibilità di acqua allorquando essa è più necessaria. Alcuni effetti si stanno già osservando: per quanto riguarda la situazione italiana, l'Associazione Nazionale dei Consorzi per la Gestione e la Tutela del Territorio e delle Acque Irrigue (ANBI) sulla base delle rilevazioni negli invasi di interesse dei Consorzi di bonifica ha recentemente denunciato che in 7 anni, dal 2010 al 2017, in Italia le disponibilità idriche si sono praticamente dimezzate, con forte accentuazione del fenomeno al Nord. A settembre 2017 (il più recente dato disponibile) erano presenti, in bacini lungo la penisola, 1.066 milioni di metri cubi contro i 1.512 del 2016, i 1.730 del 2015 e i ben 2.317 milioni di metri cubi del 2010 (Terraèvita daily n°112, ottobre 2017).

1.1.2 – Cenni sul trend climatico e delle precipitazioni nella Regione Marche e nella Provincia di Pesaro e Urbino

Per quanto riguarda la situazione nella Regione Marche e nella provincia di Pesaro e Urbino, in cui ricadono i due bacini su cui è stato realizzato il presente studio, si evidenzia come il territorio regionale abbia un clima fortemente influenzato dalla grande estensione delle coste (un km di litorale ogni 56 km² di territorio), dalla ridotta profondità del Mare Adriatico e dalla vicinanza dei

Monti Appennini alle coste, circa 60 km come media (PTA Marche, 2007). Analizzando i *trends* di temperature e precipitazioni possiamo evidenziare i seguenti aspetti:

1. I valori di temperatura nella Regione Marche hanno fatto registrare un evidente incremento a partire da metà degli anni '80 (Farina, 2013), con una temperatura media annuale del periodo 1985-2014 che supera la corrispondente media del periodo 1961-1990 di 0,6°C (13,7 contro 13,1 °C) (ASSAM, 2014). Per quanto riguarda la città di Urbino, che ricade ai margini del bacino di Santa Maria degli Angeli (il bacino su cui è stato calibrato e validato il modello idrologico oggetto di questo studio), essa presenta un trend di temperatura in aumento a partire dagli anni '50 con la media annuale del periodo 1990-2016 superiore di ben 1,5°C rispetto alla media del periodo 1960-1990 (13,8°C contro 12,3 °C, dati Protezione Civile, stazione di Urbino);
2. I valori di precipitazione nella Regione Marche hanno evidenziato una chiara diminuzione se si paragona la precipitazione media annuale del periodo 1981-2010 (799mm) con la corrispondente del periodo 1961-1990 (845 mm); in periodi più recenti, la media 2012-2014 è stata più alta della media 1961-2014 (ASSAM, 2014). Nella provincia di Pesaro e Urbino si è assistito ad un decremento dell'11% tra la media 1950-1969 e 1981-2011 (media di tutte le stazioni meteo), con picchi del -22% e qualche incremento fino a +6,2% (Spina & Amici, 2012; Farina, 2013; Cavitolo, 2014). Per quanto riguarda Urbino (dati Protezione Civile) il trend è differente poiché la media del periodo 1951-1979 è circa coincidente con la media 1980-2016 (853 mm contro 849 mm), con una media annuale del periodo 2010-2016 di circa 900 mm, la più alta dal decennio 1960-1969 (908 mm), ma con un decremento negli ultimi 3 anni (2014-2016). Considerando che il trend della temperatura per Urbino è in aumento, il fatto che la media annuale delle piogge non sia diminuita non scongiura dal rischio carenza idrica in quanto tanto più la temperatura è alta tanto maggiore è la evapotraspirazione, e ciò riduce quindi la disponibilità di acqua.

1.1.3 – Cenni sul trend dei deflussi nella provincia di Pesaro e Urbino

Nella provincia di Pesaro e Urbino circa il 75% dell'acqua potabile viene prelevata da corpi idrici superficiali (fiumi, invasi) (AATO 1, 2010, Farina, 2013). Dai primi anni '90 l'uso delle falde acquifere alluvionali ha subito un decremento a causa del progressivo deterioramento della qualità dell'acqua, dovuto all'inquinamento causato principalmente dalle attività agricole e industriali (ASSAM, 2003, Farina, 2013). Tuttavia la quantità di acque superficiali disponibile si sta riducendo. Se si va ad analizzare nel dettaglio la riduzione di precipitazioni nella provincia di cui si è scritto nel punto precedente, il tasso maggiore di decremento (dal 15 al 30%) si è verificato nei mesi di gennaio e febbraio e secondariamente in novembre e dicembre, ovvero in mesi in cui spesso i suoli sono saturi e quindi c'è un alto valore di ruscellamento superficiale (Farina, 2013, Cavitolo, 2014): questo significa un ridotto apporto di acque ai corpi idrici superficiali. Cavitolo (2014) ha mostrato che, nel periodo 1982-2011, la portata media del Fiume Metauro (circa 12 m³/secondo) è diminuita del 40% rispetto alla media storica (20 m³/secondo), attribuendo le cause sia al cambiamento climatico che alle variazioni di uso del suolo. In particolar modo, l'abbandono delle campagne a seguito del grande sviluppo economico del secondo dopoguerra e la successiva riforestazione (sia naturale con

recupero dei seminativi abbandonati, sia artificiale per ridurre l'erosione in siti degradati, si veda per esempio il caso della Riserva del Furlo) ha aumentato il tasso di infiltrazione e ridotto il ruscellamento superficiale e di conseguenza è diminuito l'apporto di acqua ai corpi idrici superficiali.

1.2 – OBIETTIVI DELLA RICERCA E CENNI METODOLOGICI

Alla luce di quanto sopra riportato, si è riscontrata la necessità di approfondire le tradizionali procedure che consentono la stima delle risorse idriche a livello di bacino idrografico. Queste contemplano l'utilizzo della equazione di bilancio idrogeologico (cap. 3.1) per quantificare le entrate/uscite di acqua dal territorio oggetto dell'indagine. I bilanci possono essere applicati alle svariate scale temporali, tenendo in considerazione che l'aumento della scala temporale comporta un aumento della richiesta di dati e dell'ammontare dei calcoli ma consente una precisione dei risultati maggiore. L'obiettivo primario del lavoro di dottorato è stato la **modellazione di un bilancio idrogeologico a scala temporale giornaliera** che consentisse di applicare a livello di bacino il metodo estremamente preciso che viene utilizzato in agricoltura per la stima dell'acqua necessaria all'irrigazione. Questo processo influisce sulla determinazione della evapotraspirazione potenziale (Cap. 3.2, Cap 5) considerando le colture agrarie presenti nel terreno nonché le loro fasi fenologiche (fase iniziale, di sviluppo, maturità, finale): vengono utilizzati coefficienti colturali (Kc) per la correzione dell'evapotraspirazione potenziale. L'obiettivo è stato trovare, tra i coefficienti presenti in letteratura, la giusta combinazione per poter modellare anche gli usi del suolo non agricoli quali terreni a riposo, incolti, bosco rado, aree presso edificato ecc. Da qui in avanti tale modello di bilancio idrogeologico giornaliero redatto su base fenologica sarà chiamato più brevemente "bilancio fenologico".

Un accorgimento importante è stato tener conto nel bilancio della superficie reale del territorio (il quale è variamente acclive) e non di quella proiettata (piana) come viene usualmente fatto nei bilanci. A tal fine la realizzazione di un dettagliato modello digitale del terreno ha consentito di calcolare il rapporto tra superficie reale e superficie proiettata, denominato coefficiente di acclività, e di correggere la evapotraspirazione potenziale calcolata con il metodo Penman Monteith (ETO PM) e le precipitazioni (Cap. 4).

Ogni modello che si rispetti va calibrato e validato. A tal fine si è reso necessario eseguire **misurazioni dei parametri utili al calcolo delle portate (velocità e sezione)** alla sezione di chiusura del bacino oggetto di indagine che, oltre a fornire il valore di deflusso di base (espresso in mm) necessario alla calibrazione e validazione del bilancio, ha permesso anche di acquisire una notevole mole di dati per un bacino che era privo di stazione di misura. Il territorio di studio è il bacino del Fosso Santa Maria degli Angeli (denominato bacino SMA da qui in avanti), piccolo bacino di circa 14 km² posto a sud di Urbino, sottobacino in sinistra idrografica del bacino del medio-alto Metauro (confluenza a Bivio Borzaga). Dato che nel bacino vi è lo scarico di un depuratore in cui confluisce acqua proveniente da aree esterne al bacino, è stato necessario sottrarre questo contributo dal calcolo dei deflussi.

Un'altra serie di misure è stata effettuata alla sezione di chiusura del bacino del medio-alto Metauro a Calmazzo, poco prima della confluenza con il Fiume Candigliano, in previsione di una futura

applicazione del bilancio ad un bacino di più grande estensione (412 km²). Per la sezione di chiusura del medio-alto Metauro non venivano eseguite misurazioni di portata probabilmente dagli anni '70 (da parte dell'Istituto idrografico nazionale). Le misure hanno avuto cadenza settimanale per gli anni 2013, 2014, 2015, 2016, indi mensile per l'anno 2017 (fuori bilancio). Il confronto tra le portate misurate dei due bacini è avvenuto comparando anche le caratteristiche dei due territori sotto molteplici aspetti (tab. 2.5 e cap.8). Uno dei problemi è stata la scarsità di stazioni meteo disponibili per il bacino del Metauro, di cui nessuna alle alte quote. Si è allora effettuata una regressione quota/precipitazioni per il periodo 1960-2003 delle medie mensili di tutte le stazioni della Provincia di Pesaro e Urbino. Attraverso le aree coperte dalle superfici altimetriche (fig. 2.21) si è giunti alla stima delle precipitazioni a livello di bacino. Tale procedimento è però applicabile solo alle precipitazioni mensili poiché le regressioni sono state calcolate con dati mensili.

La notevole mole di dati ha consentito di raggiungere un altro obiettivo della ricerca: la determinazione di **relazioni idrauliche** che facilitassero la stima delle portate in condizioni di piena. Attualmente questo risultato viene conseguito a partire dalla curva di deflusso che correla livelli con portate; dato che esistono ormai strumenti (radar) che consentono anche a distanza di misurare la velocità massima superficiale del flusso, è apparso necessario trovare delle relazioni che legassero la massima velocità superficiale con la velocità media del flusso, il che consentirebbe una maggiore precisione nella stima della portata (una volta determinata la sezione la portata è presto calcolata con maggiore attendibilità rispetto alla curva di deflusso). Il risultato è sito-specifico ma fornisce valori di riferimento importanti e relativi a due bacini di differenti estensione e caratteristiche fisiografiche.

Il monitoraggio dei livelli piezometrici di 6 pozzi nel territorio di studio ha consentito un'ulteriore validazione del modello.

Un ulteriore obiettivo è stato lo **studio dell'uso del suolo a livello di bacino**, fondamentale per l'applicazione del bilancio fenologico. A tal fine, per il bacino SMA è stata redatta la mappa di uso del suolo 2013 (anno di calibrazione del bilancio) ed aggiornata (relativamente alla sola conduzione seminativi, unico aspetto che varia in un range temporale così ristretto) agli anni 2014, 2015 e 2016 (validazione del bilancio). È stata fatta anche un'analisi della variazione temporale dell'uso del suolo del bacino tracciando la mappa 1955 che si è aggiunta a quella del 2013 e quella del 1997 (redatta in fase di tesi specialistica).

1.3 – METODOLOGIA STEP BY STEP PER IL CALCOLO DI BILANCIO

Di seguito si riportano i passi per la redazione del bilancio idrogeologico giornaliero redatto su base fenologica (Cap. 4.3):

1. acquisizione ed elaborazione dei dati meteorologici (Cap. 1.4) necessari per la determinazione di vari parametri o sotto-parametri del bilancio: precipitazioni, evapotraspirazione potenziale, correzione climatica dei coefficienti ecc.

Per ogni anno di bilancio:

2. aggiornamento della conduzione dei seminativi (grano, girasole, erba medica ecc.) e calcolo delle relative aree;
3. calcolo del valore di *curve number* (CN) a livello di bacino, necessario per il calcolo del ruscellamento superficiale;
4. calcolo degli intervalli per le *antecedent soil moisture conditions*, determinazione del tipo di CN (I, II o III) per ogni giorno di bilancio e assegnazione del corrispondente valore del parametro B;
5. correzione climatica dei coefficienti (Kc) assegnati alle varie componenti di uso del suolo;
6. calcolo del coefficiente da terreno nudo su base bisettimanale;
7. determinazione del coefficiente colturale unico a livello di bacino (Kc bacino);
8. calcolo della evapotraspirazione potenziale (ET₀ PM) con il metodo Penman Monteith;
9. correzione della ET₀ PM e delle precipitazioni con il coefficiente di acclività (ET_{0a} e P_a);
10. correzione della ET_{0a} con il Kc bacino e ottenimento della evapotraspirazione potenziale colturale (ET_c);
11. Calcolo della riserva idrica utile dei suoli (TAW, *total available water*);
12. Calcolo giornaliero del parametro P;
13. Calcolo del ruscellamento giornaliero con il metodo *curve number* adattato alla simulazione in continuo (Williams et al., 2007, PRTA Regione Friuli, 2015);
14. Calcolo del bilancio idrogeologico giornaliero con determinazione della evapotraspirazione reale (mediante coefficiente da stress idrico, K_s), della variazione globale della riserva idrica del suolo, e infine con determinazione della percolazione profonda (la quota di acqua che eccede la riserva idrica, si infiltra nel sottosuolo e raggiunge le falde acquifere prima e la sezione di chiusura del bacino poi).

Si vedano anche le tabelle 4.1 e 4.8.

Terminati i calcoli del bilancio la procedura prevede il confronto tra i valori mensili e annuali della percolazione profonda ed i valori mensili e annuali del deflusso di base calcolato sulla base delle misure delle portate. Viene inoltre effettuato un confronto con l'andamento mensile delle falde acquifere superficiali monitorate e il bilancio è validato se c'è corrispondenza degli andamenti previa verifica che vi sia anche un certo ritardo tra il massimo di percolazione profonda calcolato dal modello e il massimo del deflusso di base e del livello piezometrico misurati (cap.10.2).

Tutti i passi della metodologia verranno descritti nel dettaglio nel corso di questa relazione.

1.4 – STRUMENTI

Cinque sono stati gli strumenti di vario genere ampiamente utilizzati nelle varie fasi del lavoro:

a) Strumenti di misurazione

1. mulinello idrometrico per la determinazione della velocità del flusso dell'acqua: nell'ambito della misura delle portate;
2. freatimetro per la misura del livello delle falde acquifere;

b) Strumenti softwares per l'elaborazione dei dati:

3. GIS (Geographic Information System) per la mappatura del suolo e per tutte le elaborazioni di analisi spaziale (incrocio dati tra vari *layers* come geologia, uso del suolo, permeabilità e altro, calcolo di pendenza ed esposizione, ecc.);
4. Fogli di calcolo: ampiamente utilizzati per tutte le elaborazioni di bilancio (calcolo dei coefficienti, calcolo del ruscellamento, calcolo del bilancio giornaliero ecc.) e la realizzazione di grafici;
5. Programma di computer-grafica per l'elaborazione delle immagini e mappe.

1.5 – PROVENIENZA DEI DATI DI BASE E PARAMETRI DEL BILANCIO IN CUI SONO UTILIZZATI

La tabella 1.1 riporta le fonti da cui sono stati ottenuti i dati necessari per le elaborazioni del bilancio; ad ogni tipologia di dato sono associati solo il parametro/i parametri in cui il dato entra direttamente per il calcolo. Ad esempio la tessitura dei suoli entra direttamente nel calcolo della riserva idrica dei suoli, ed indirettamente nel bilancio fenologico (in cui entra direttamente il valore di riserva idrica). Tutte le relazioni dirette tra i parametri sono riportate in tabella 3.1.

°	DATO DI BASE	PARAMETRO DI APPLICAZIONE DIRETTA	FONTE	Bacino di applicazione
1	Dati di precipitazione giornaliera	Precipitazioni, coefficiente da terreno nudo, ruscellamento, bilancio fenologico	Osservatorio meteorologico "A. Serpieri" di Urbino (4 stazioni meteo: Urbino, Cesane, ex Sogesta, Fermignano) Protezione Civile della Regione Marche (3 stazioni meteo: Urbino, Urbania, S. Angelo in Vado)	SMa* maMet**
2	Temperatura minima e massima, umidità relativa minima e massima, pressione, velocità del vento, radiazione solare (giornalieri)	Evapotraspirazione potenziale (ETO PM) e correzione climatica Kc	Osservatorio meteorologico "A. Serpieri" di Urbino (4 stazioni meteo) Protezione Civile della Regione Marche (solo per la radiazione solare, stazione meteo di Urbino)	SMa
3	Coefficienti colturali (Kc)	Kc unico di bacino	Quaderno FAO n° 56 (Allen et al., 1998) Eccel et al., 2007 WUCOLS IV California Osservazioni di campagna (per la composizione e la durata delle fasi fenologiche di alcuni usi del suolo non tabellati)	SMa
4	Ortofoto aeree 1955, 1997, 2013	Mappa di uso del suolo 1955, 1997, 2013	A.G.E.A. (attraverso Comune di Urbino e Unione Montana del medio e alto Metauro)	SMa
5	Immagini aeree 2016	Aggiornamento mappa di uso del suolo 2013	Google Earth Pro	SMa
5	Tessitura del suolo Profondità media delle radici delle componenti di uso del suolo	Riserva idrica del suolo	Profilo pedologico realizzato da ASSAM, 2003 Quaderno FAO n° 56 (Allen et al., 1998) Altre fonti di letteratura	

6	Coefficienti di infiltrazione potenziale	Infiltrazione potenziale calcolata al di fuori del bilancio, come ulteriore validazione	Celico, 1988	SMa
7	Superficie reale e proiettata del bacino	Coefficiente di acclività	Elaborazioni GIS	SMa maMet
8	Geologia e coperture del bacino	Riserva idrica del suolo, CN bacino attraverso la definizione di classi di permeabilità	Tesi di laurea Loredana Taurino e Silvia Gori, PAI Marche, carta geologica CARG sezioni 279080 e 279120	SMa
9	Classi di vulnerabilità-permeabilità	Comparazione portate SMa-maMet (no per bilancio)	Elaborazione del Dott. Federico Biagiotti sulla base del Bollettino Ufficiale della Regione Marche, anno XXXI n°38 del 23/11/2000	SMa maMet
10	Dati di precipitazione mensile	Regressione quota/precipitazioni per la stima delle precipitazioni a livello di bacino (no per bilancio)	Istituto Idrografico Nazionale di Bologna	maMet

Tab. 1.1 – dati di base e parametri a cui sono applicati, con fonti dei dati di base stessi

*SMa = bacino del Fosso di Santa Maria degli Angeli

** maMet = bacino del Fiume medio e alto Metauro

CAPITOLO 2 – LE AREE DI STUDIO

2.1 – IL BACINO DEL FOSSO DI SANTA MARIA DEGLI ANGELI

2.1.1 – Le caratteristiche del bacino “intero”: fisiografia, ordine del bacino, fasce altimetriche, esposizione, pendenza

Il bacino del Fosso di Santa Maria degli Angeli (SMa da qua in avanti, fig. 2.1 e 2.2, tab. 2.1) è il territorio di studio ove il modello di bilancio fenologico è stato calibrato e validato.



Fig. 2.1 - la vallata principale del bacino del fosso Santa Maria degli Angeli visto da Est (foto 12/02/2014). Si nota il tratto di strada chiamato “Bretella” e il ponte della vecchia ferrovia in secondo piano.

		Coordinate Gauss Boaga fuso Est		Coordinate geografiche WGS 84	
Estremo bacino	località	Latitudine Nord	Longitudine Est	Latitudine Nord	Longitudine Est
Nord	monte della Cesana, località il Caldeese (NE del bacino),	<u>4844466,6</u>	2331433,4	<u>43°43'45"</u>	12°39'31
Sud	Cà Cerione (SW del bacino) circa come la confluenza del fosso sul fiume Metauro	<u>4840240,6</u>	2327958,2	<u>43°41'25"</u>	12°37'01"
Est	Confluenza del fosso sul fiume Metauro, circa come località Scaramucci, presso chiesa di Sant'Eufemia	4840610,1	<u>2332490,4</u>	43°41'41"	<u>12°40'23"</u>
Ovest	Cimitero San Cipriano	4841385,7	<u>2326658,7</u>	43°42'00'	<u>12°36'02"</u>
Estensione in linea d'aria del bacino nelle due direzioni					
nord-sud		4226 m (00°02'20")		est-ovest	5832 m (00°04'21")

Tab. 2.1 – estremi del bacino con coordinate geografiche fuso est del Gauss Boaga e coordinate geografiche WGS84

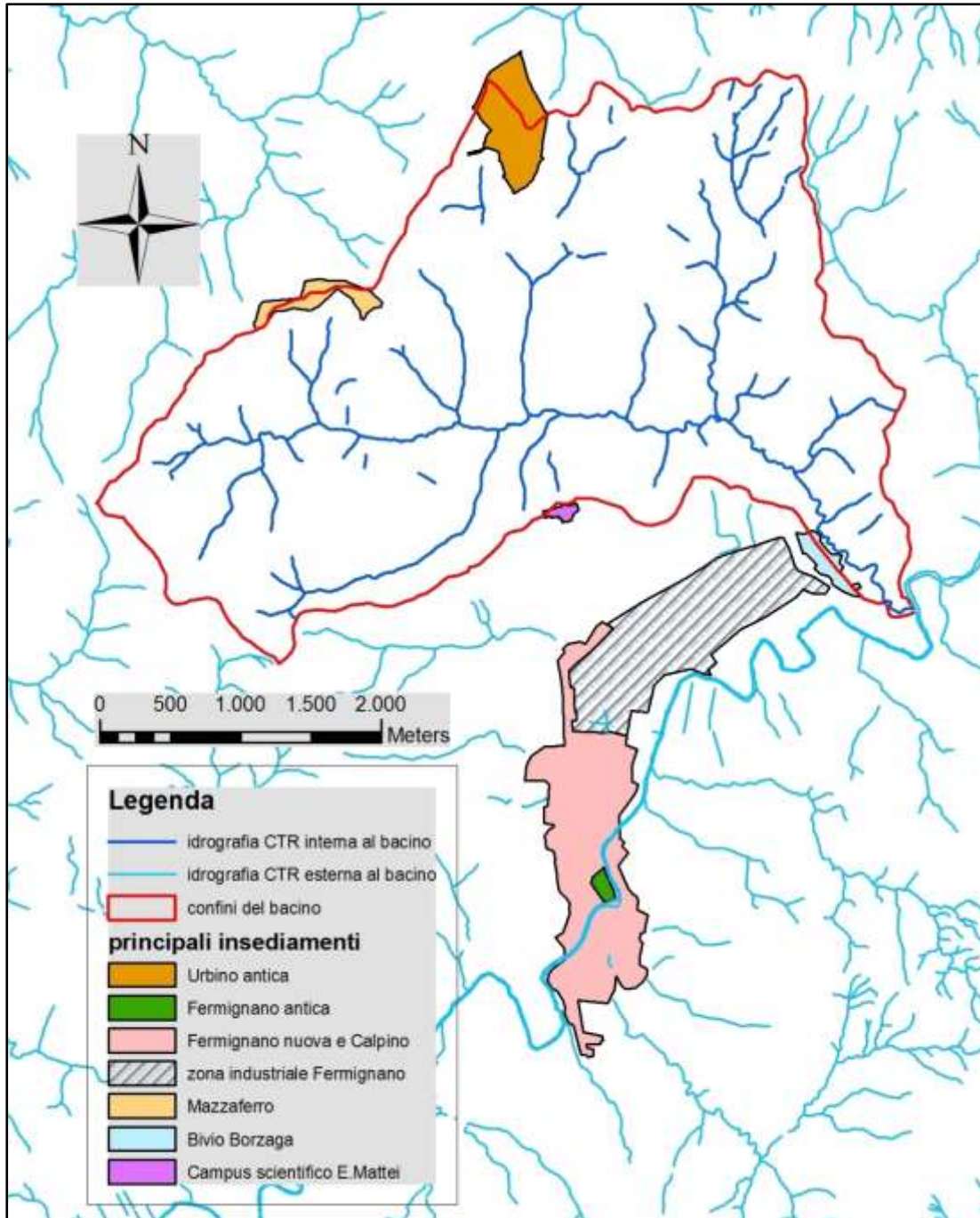


Fig. 2.2 – Il bacino del Fosso di Santa Maria degli Angeli (superficie reale di circa 14 km²)

Per analizzare i fattori che influenzano la circolazione idrica all'interno del bacino è stata fatta un'accurata indagine territoriale. Il territorio è un sottobacino in sinistra idrografica del bacino del fiume Metauro e il fosso Santa Maria degli Angeli vi confluisce poco prima che il Metauro passi tra i Monti delle Cesane e il Monte Pietralata (che assieme al monte Paganuccio forma la Dorsale del Furlo, figg. 2.2 e 2.3). Il bacino presenta una superficie proiettata di 13,451 km² (o 1345,1 ettari), mentre la superficie reale (calcolata mediante modello digitale del terreno) è di 14,353 km² (1435,3 ettari). Il perimetro reale del bacino è di circa 20,6 km. La quota media è di 332 m. s.l.m., la pendenza media è del 32,6% (≈18,1°).

Le figure seguenti riportano alcune caratteristiche fisiografiche del bacino. Vengono poi illustrati i grafici delle classi di pendenza e di esposizione (fig. 2.12 e 2.13).

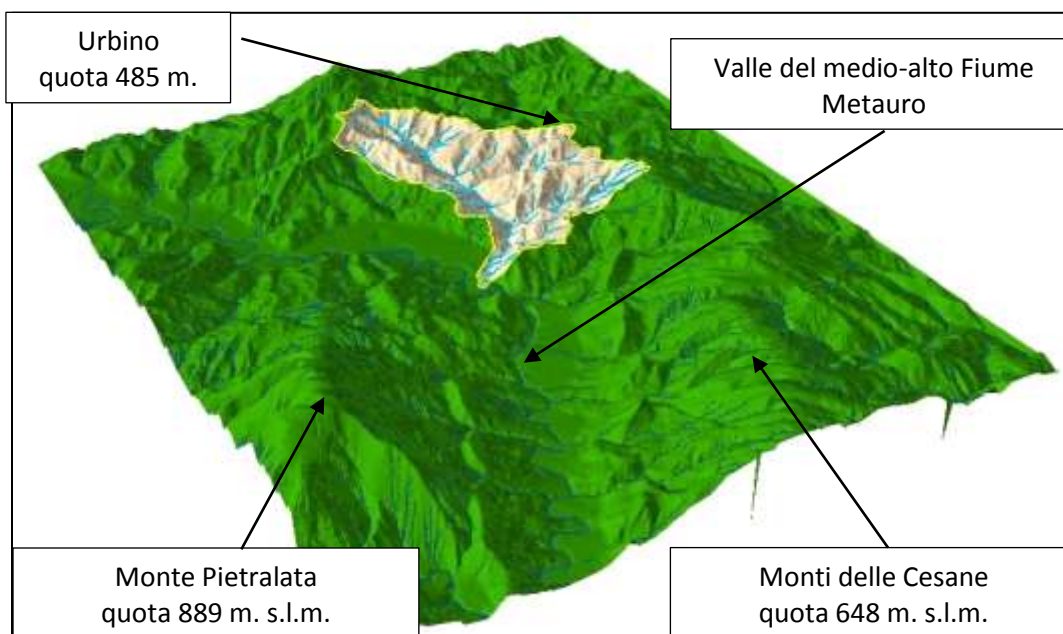


Fig. 2.3 – modello 3D del territorio del bacino SMA. Il Fosso confluisce nel fiume Metauro poco prima dell’inizio della valle compresa tra il Monte Pietralata e i Monti delle Cesane

Il bacino presenta un restringimento nella parte finale allorché lo spartiacque segue la linea di Bisciario, litologia più resistente all’erosione (si veda fig. 2.15)

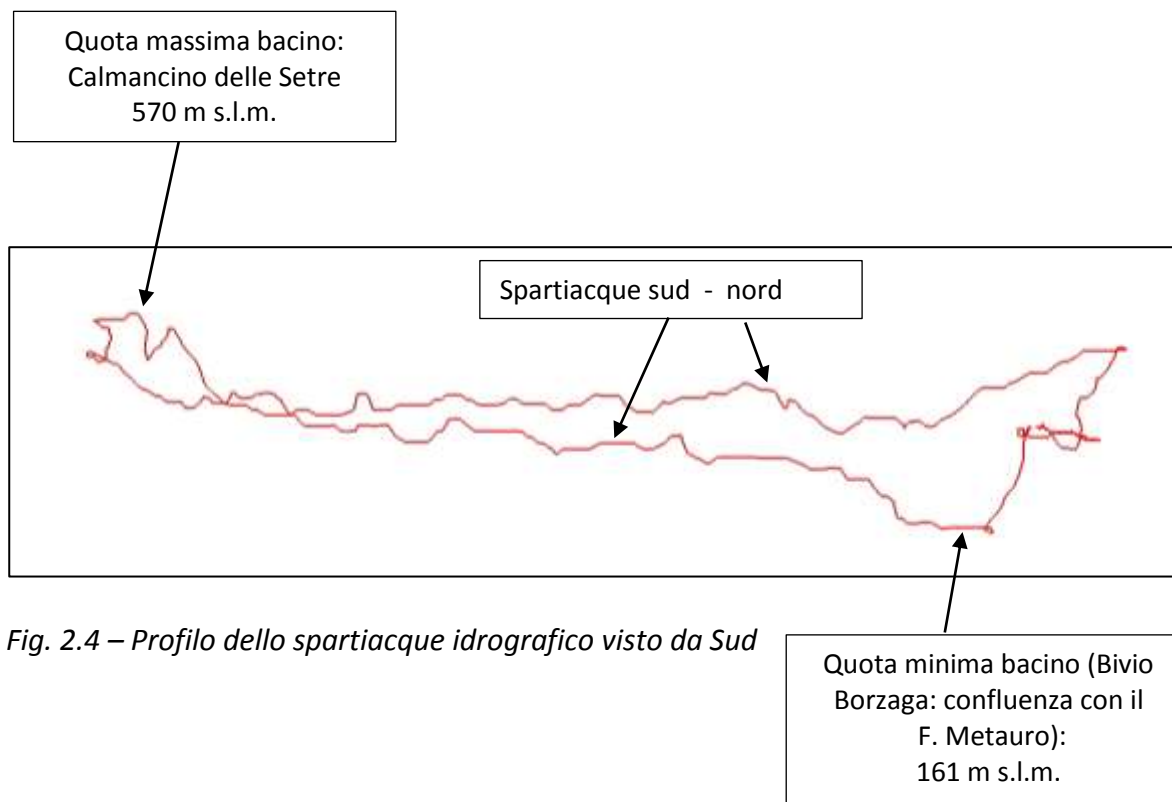


Fig. 2.4 – Profilo dello spartiacque idrografico visto da Sud

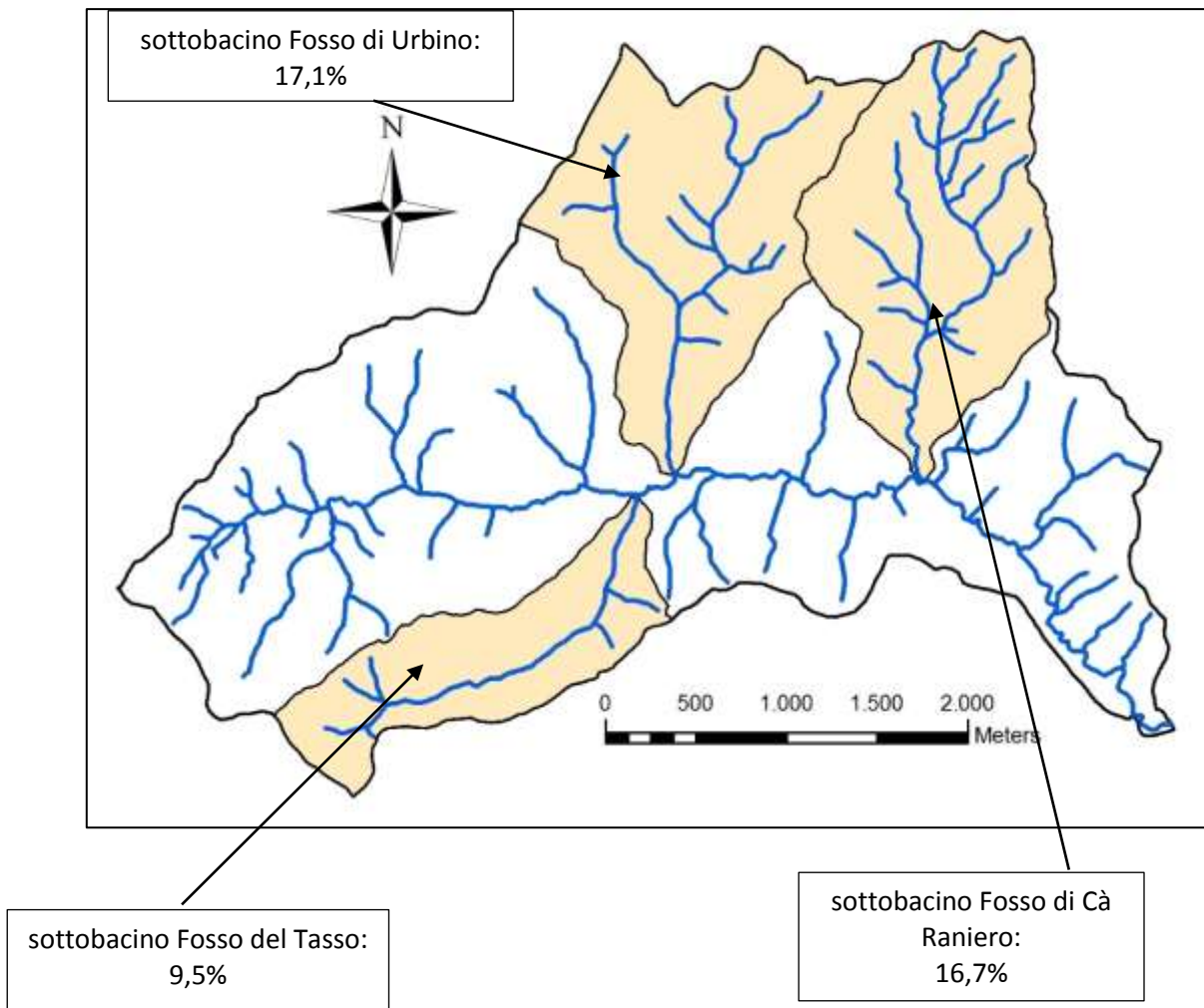
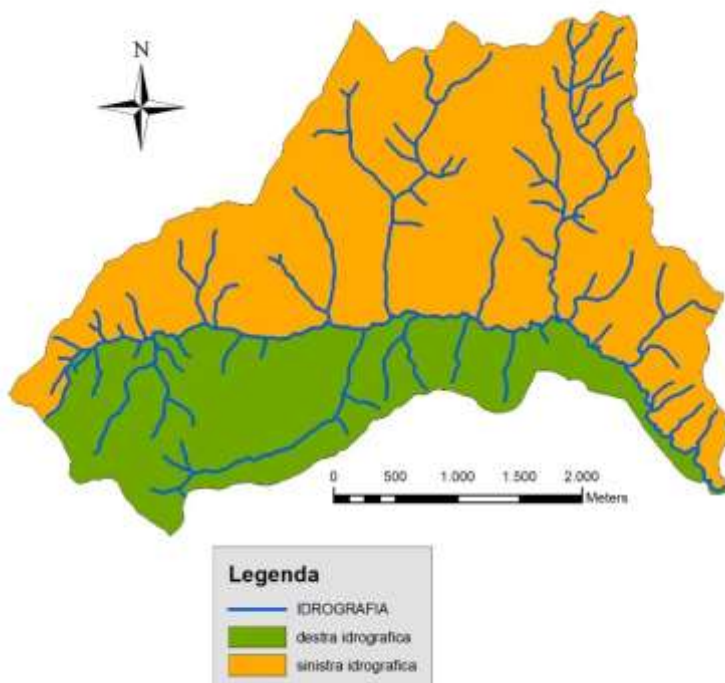


Fig. 2.5 – Sottobacini principali del bacino SMa con le percentuali della estensione della superficie proiettata rispetto alla superficie proiettata totale.



Il 56,7% del territorio è occupato da sottobacini più piccoli. Si nota anche come la porzione di bacino in destra idrografica (circa il 31% della superficie totale proiettata) sia meno estesa della porzione in sinistra idrografica (circa il 69% della superficie totale proiettata) (fig. 2.6).

Fig. 2.6 – bacino in sinistra e destra idrografica

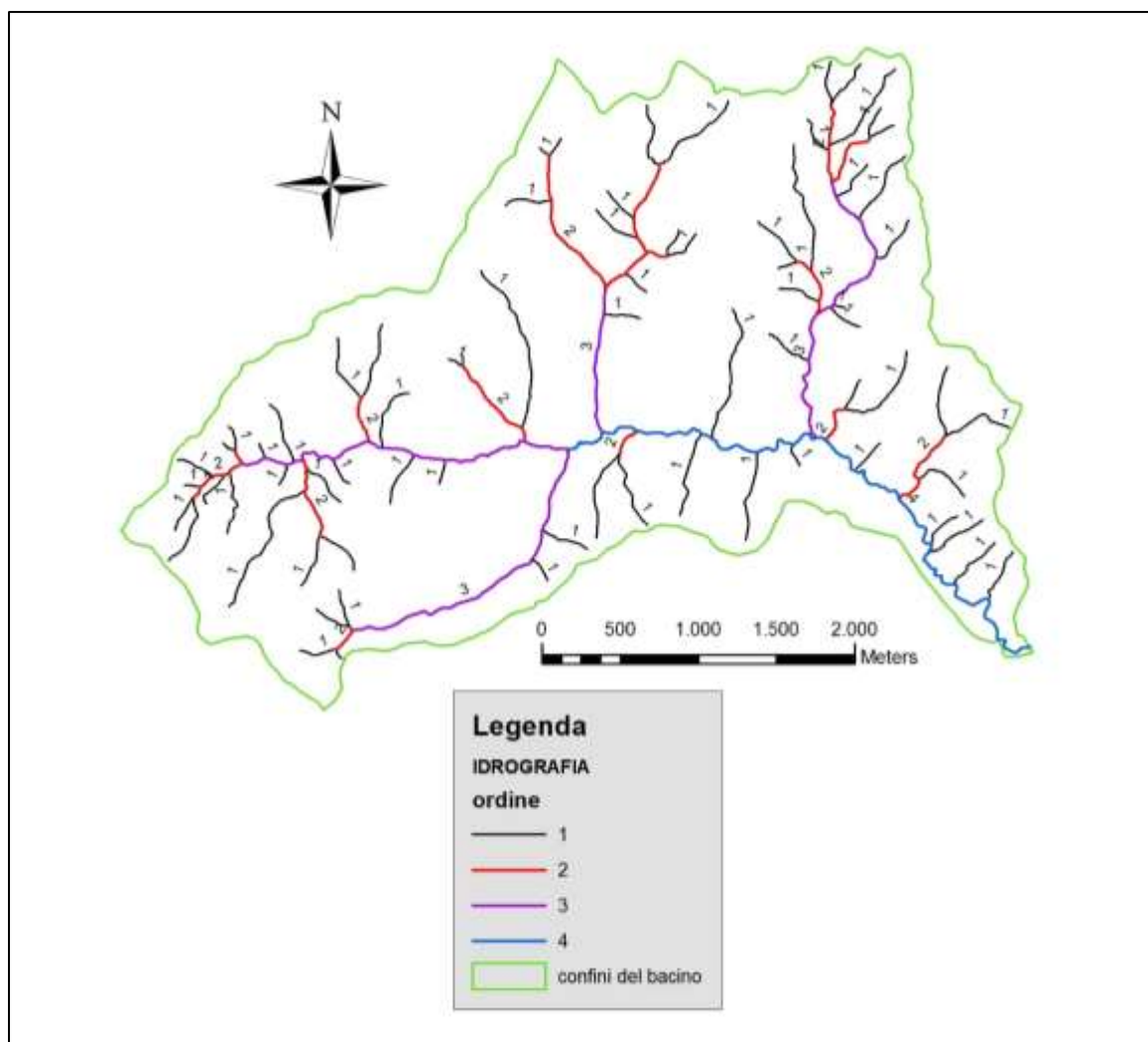


Fig. 2.7 - gerarchizzazione del reticolo idrografico secondo Strahler. Quasi tutti i tronchi e segmenti hanno una etichetta (label) che ne indica l'ordine, per quelli mancanti si fa riferimento ai colori della legenda.

L'ordine di Strahler dipende dal dettaglio con cui sono tracciati i corsi d'acqua. Facendo riferimento alla carta tecnica regionale (CTR), l'ordine del bacino è 3; in questo caso il reticolo idrografico è stato disegnato a un dettaglio maggiore. Il pattern e la densità del reticolo idrografico dipendono da:

- clima
- litologia
- spessore e tipologia dei suoli
- uso del suolo
- assetto strutturale (faglie, pieghe ecc.)
- pendenza

Le figure 2.8 e 2.9 riportano rispettivamente in formato di mappa e in formato di grafico la distribuzione delle fasce altimetriche del bacino.

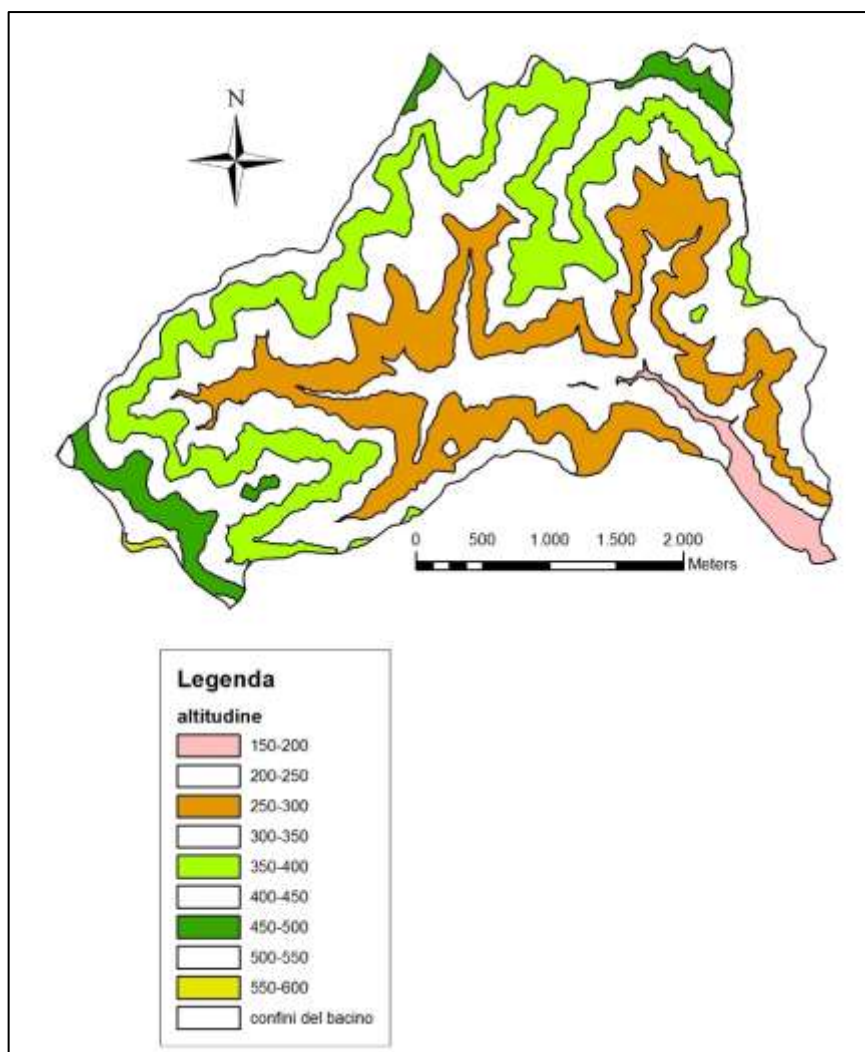


Fig. 2.8 – mappa riportante le fasce altimetriche del bacino (equidistanza 50m)

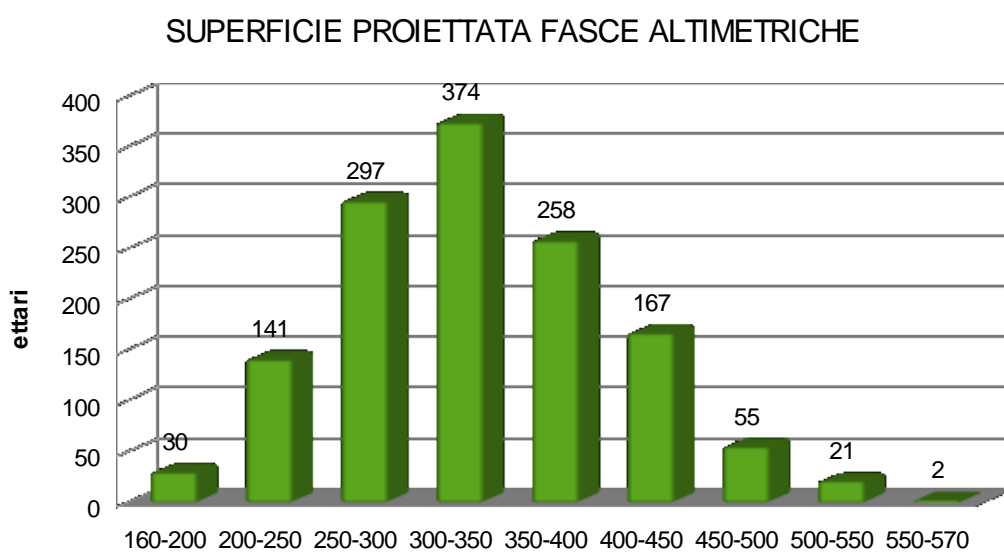


Fig. 2.9 – grafico riportante le fasce altimetriche del bacino con le rispettive aree (equidistanza 50m)

Sono prevalenti le fasce alle quote intermedie come è caratteristico dei bacini “maturi”, questo evidenziato anche dalla curva ipsografica di fig. 2.11 confrontata con le tre curve di riferimento di fig. 2.10.

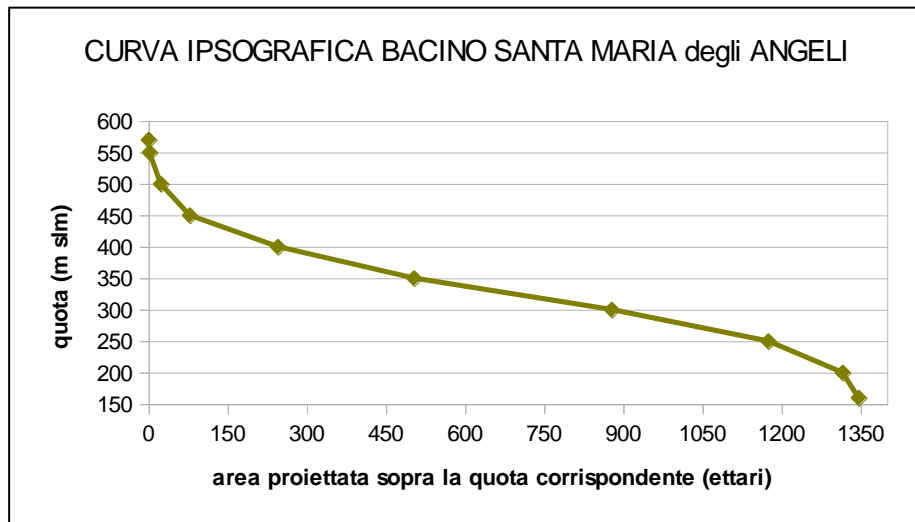


Fig. 2.10 – curva ipsografica relativa al bacino SMa

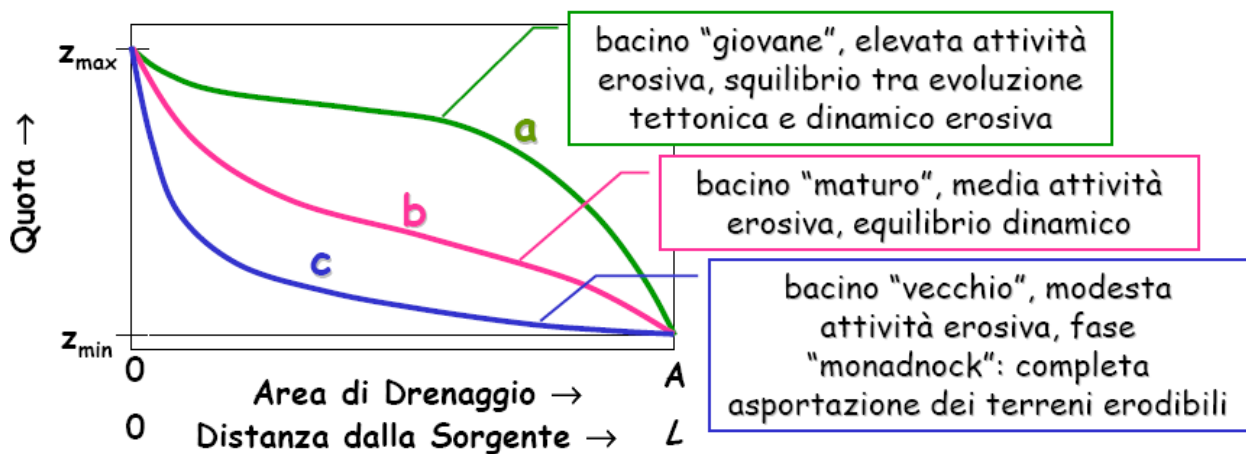


Fig. 2.11 – curve ipsografiche di riferimento. Il bacino SMa può venire annoverato tra i bacini “maturi”

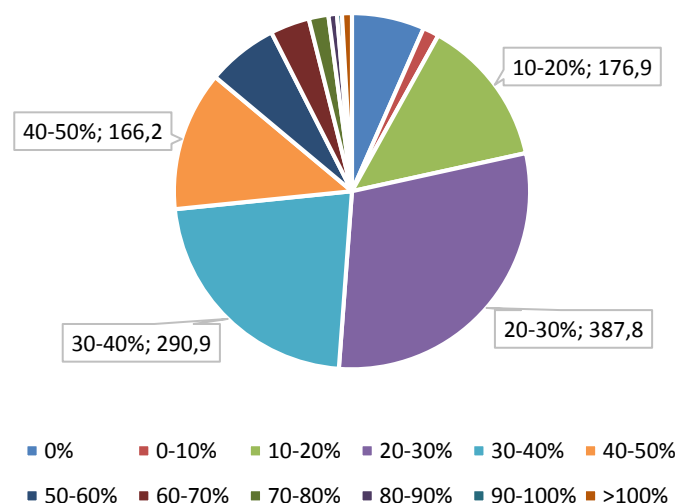


Fig. 2.12 – classi di pendenza del territorio SMA (ettari)

La classe maggiormente rappresentata è quella tra il 20 e 30%. La classe dello 0% (circa 86 ettari) è sovrastimata in quanto il modello digitale del terreno modella come superfici piane le porzioni di territorio (spartiacque e fondovalle) la cui differenza in quota non supera l'equidistanza delle isoipse CTR (10 m). Riducendo le classi, quella maggiormente rappresentata è quella oltre il 40% che comprende le aree boscate (si veda anche tab. 3.6). La valutazione delle classi di pendenza è fondamentale nel bilancio idrogeologico: a una maggiore pendenza corrispondono maggiori deflussi (infatti la pendenza entra nel valore di *curve number*, cap. 7) e minore infiltrazione (infatti il valore di pendenza entra nel coefficiente di infiltrazione efficace a livello di bacino, cap. 10)

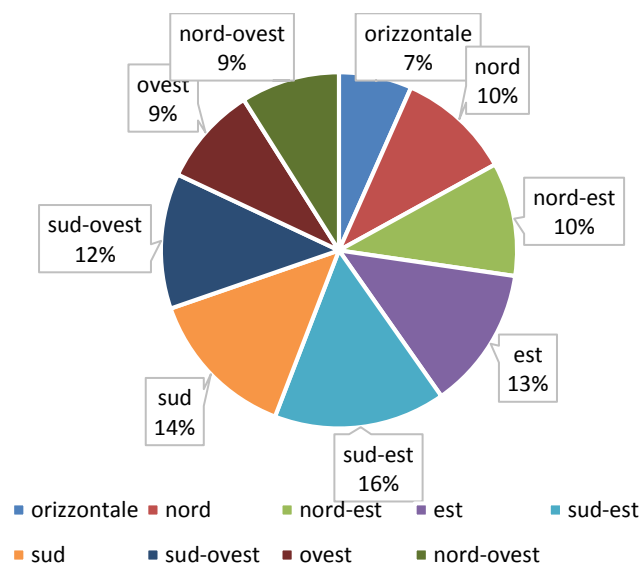


Fig. 2.13 – classi di esposizione del territorio SMA (% sull'area totale)

La maggiore estensione dell'area in sinistra idrografica rende prevalente le esposizioni meridionali e questo ha importanza nel processo di evapotraspirazione (maggiore esposizione ai raggi solari).

2.1.2 – Le caratteristiche del bacino “ridotto”: fisiografia, geologia, depositi quaternari

Dato che la stazione di monitoraggio delle portate è stata posta a circa 1km a monte della confluenza con il Fiume Metauro, al fine di evitare gli scarichi difficilmente quantificabili dell’abitato di Bivio Borzaga, il bilancio è stato calibrato e validato su una ridotta porzione di bacino, denominato bacino “ridotto” (fig. 2.14), avente superficie proiettata di 13,097 km² (1309,7 ettari) e superficie reale di 13,974 km² (1397,4 ettari). Tale bacino ha quota media di 336 m. s.l.m. e pendenza media del 32,6%.

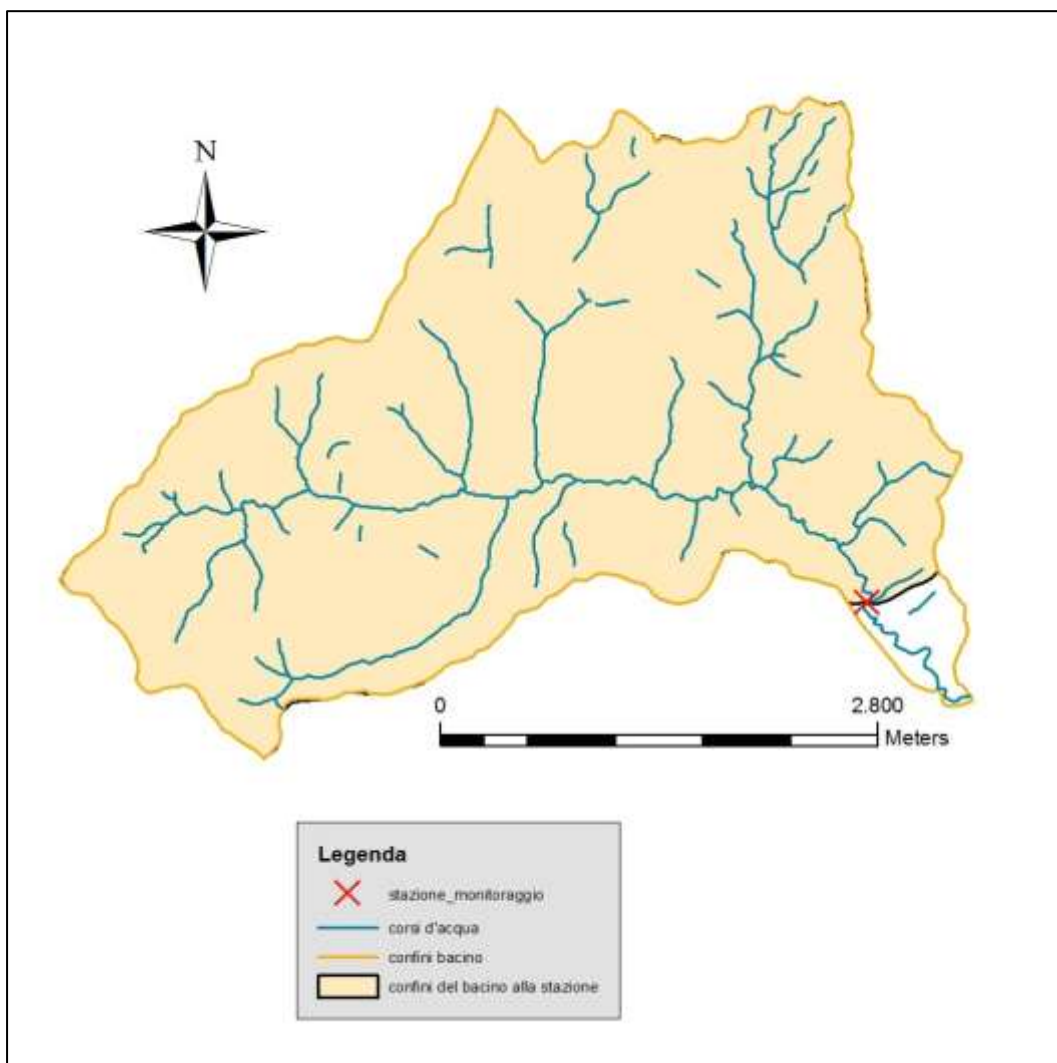


Fig. 2.14 – Ubicazione della stazione di monitoraggio delle portate e confini del bacino “ridotto”

La fig. 2.15 riporta in foto aerea l’esatta ubicazione del sito di rilevamento portate. Si nota come il punto sia più a monte dell’abitato di Bivio Borzaga, in modo da evitare il “disturbo” degli scarichi antropici.



Figura 2.15 - Ubicazione in foto aerea 1997 della stazione di monitoraggio delle portate (stella gialla, da non confondere con la rosa dei venti)

In rosso sono rappresentati i confini del bacino, in blu l'idrografia interna, in celeste l'idrografia esterna. Poco più a valle del sito di misura e di Bivio Borzaga il fosso confluisce nel fiume Metauro. È evidente in sinistra idrografica la fascia collinare di Bisciaro con gli impluvi le cui acque confluiscono nel fosso.

Le seguenti mappe riportano le formazioni geologiche (substrato, fig. 2.16) e i depositi continentali quaternari (coperture, fig. 2.17). La fonte dei dati è riportata in tabella 1.1. Le carte di geologia e coperture sono molto importanti per l'aspetto e i parametri morfometrici dell'idrografia e per il bilancio idrogeologico. La proprietà determinante è la **permeabilità**: le formazioni geologiche sono alternanze di calcari e marne (Bisciaro), marne e calcari (Schlier), arenarie e marne (Marnoso Arenacea). Le marne riducono molto la permeabilità poiché molte delle fratture (causa della permeabilità secondaria che è preponderante in queste formazioni geologiche) si interrompono all'interno di tale litologia; nelle zone ove sono

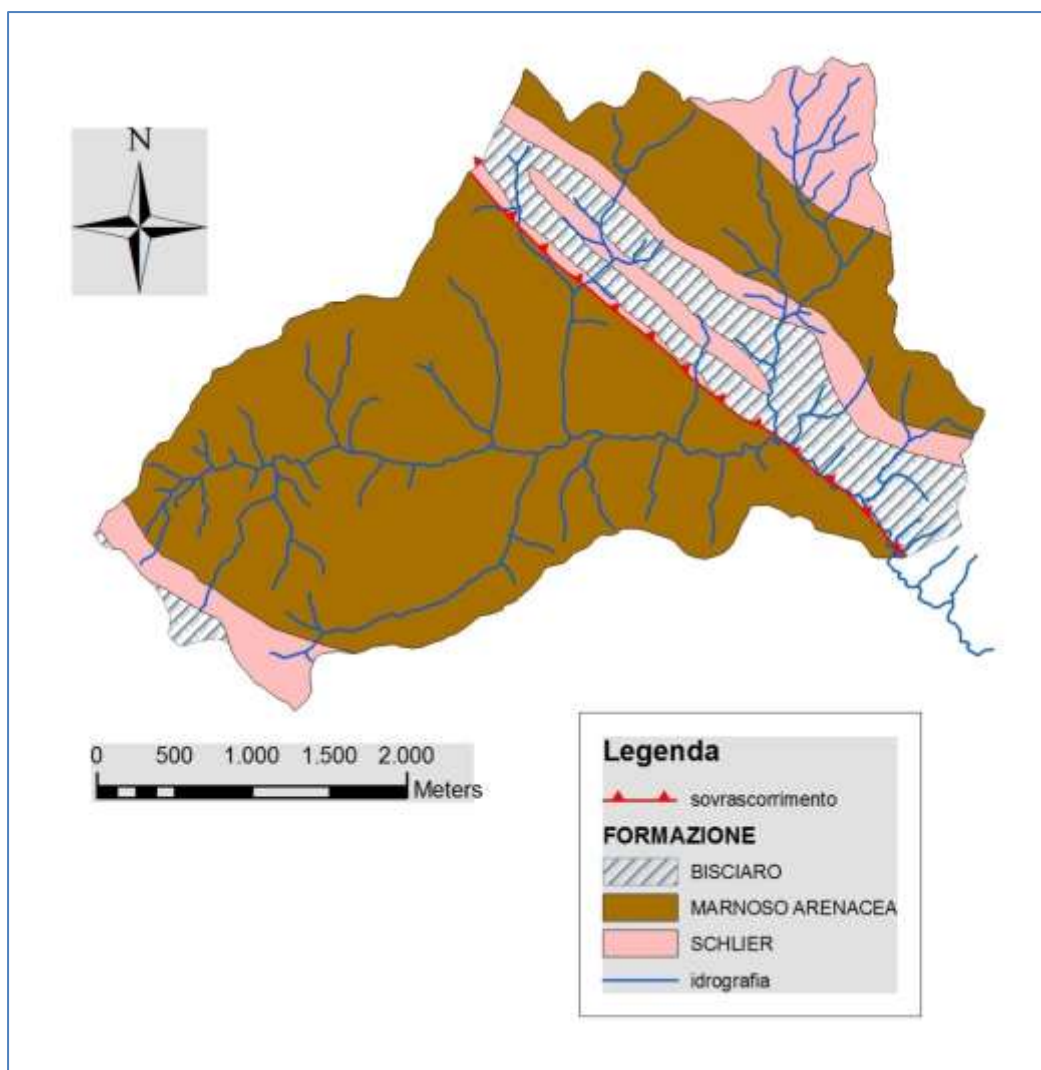


Fig. 2.16 – carta delle formazioni geologiche del bacino ridotto

presenti i depositi quaternari, in cui è presente materiale meno coerente del substrato, la permeabilità è maggiore. Osservando la carta geologica si nota l'aumento della densità del drenaggio nella zona Nord-Est del bacino ove è affiorante lo Schlier, formato in prevalenza da materiale fine (marne). I fossi di Urbino e Cà Raniero tagliano la dorsale di Bisciario nonostante sia un materiale a forte resistenza. Osservando la carta dei depositi si nota come molti fossi secondari attraversano aree in frana e particolare è il tratto sommitale del fosso di Cà Raniero (zona Nord-Est) che segue il confine di un'area di frana. La fig. 2.18 riporta le superfici proiettate dei depositi che complessivamente coprono circa il 50,4% del bacino ridotto (per problemi di mancanza dati in una piccola parte del bacino, a SW, i depositi sono incompleti relativamente ai detriti di versante). La tabella 2.2 riporta la pendenza media delle aree su cui affiorano le diverse formazioni geologiche. I dati confermano la maggiore resistenza all'erosione del Bisciario.

FORMAZIONE GEOLOGICA	PENDENZA MEDIA (%)
Bisciario	41,2
Schlier	34
Marnoso Arenacea	30,6

Tabella 2.2 – pendenza media delle aree su cui affiorano le formazioni geologiche

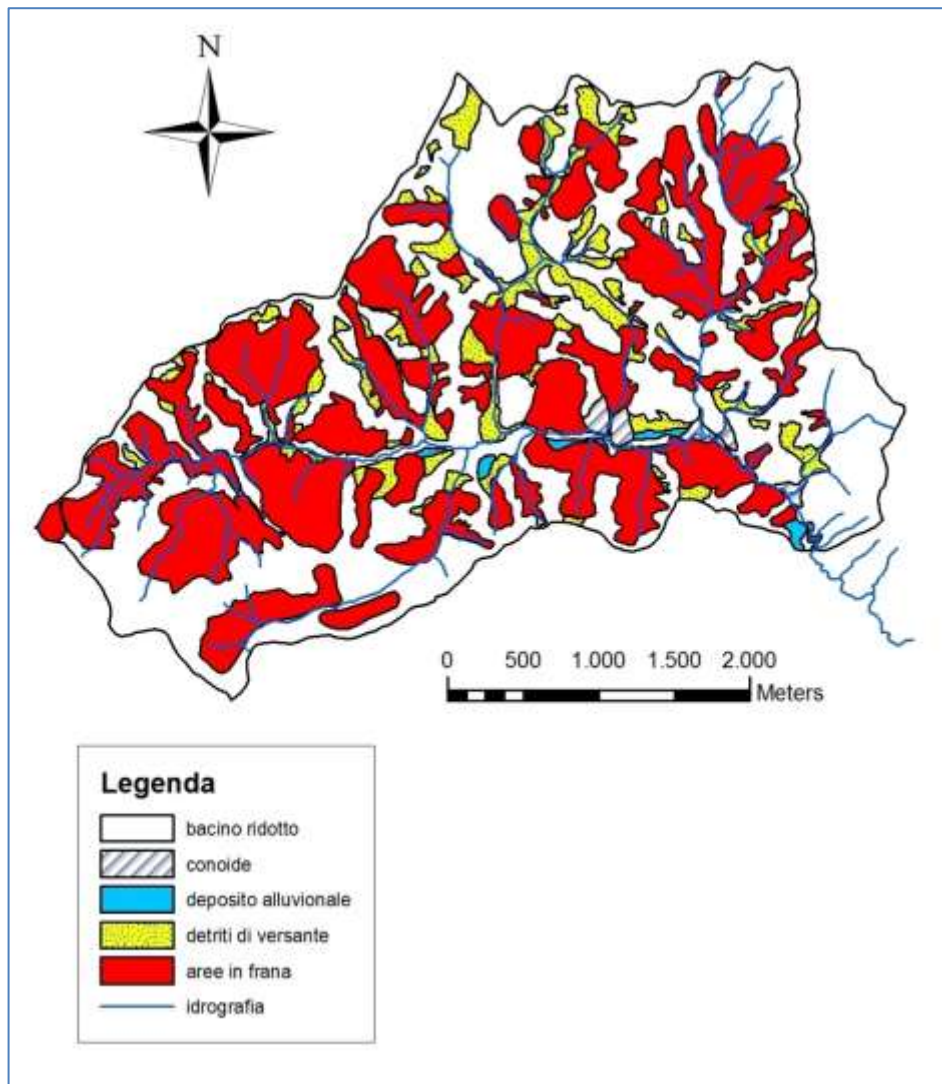


Figura 2.17 – carta dei depositi continentali quaternari del bacino ridotto

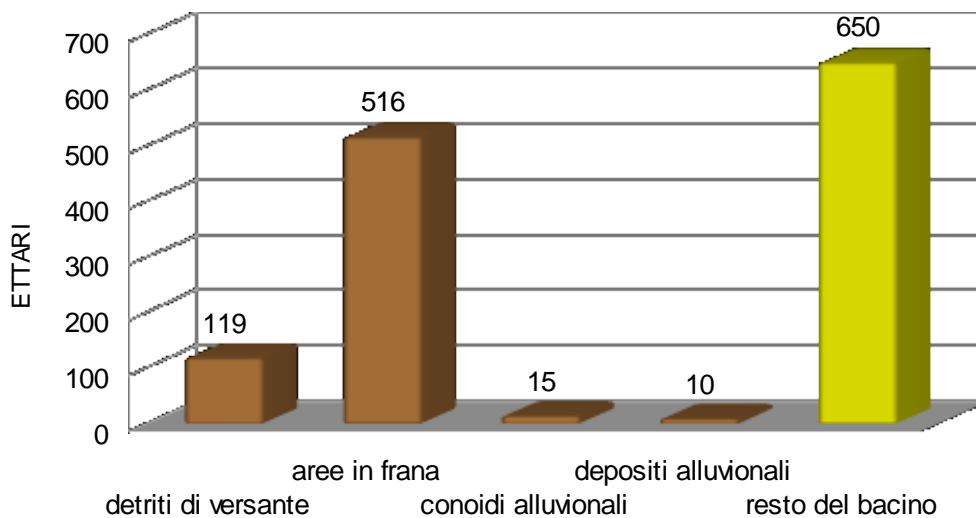


Figura 2.18 – superfici proiettate delle coperture e del resto del bacino “ridotto”

Interessante è il dato della pendenza media dei depositi di copertura e delle aree prive di coperture, queste ultime distinte secondo il substrato geologico, riportato nella tabella 2.3. I depositi sono complessivamente su pendenze minori a causa della minore coerenza dei materiali che li rende più soggetti all'erosione. Le aree non coperte da depositi sono a pendenza media leggermente più elevata rispetto alle corrispondenti aree della tabella 2.2 (che comprendono anche le aree su depositi) confermando l'effetto dei depositi sulla pendenza media.

SUBSTRATO	PENDENZA MEDIA (%)
Depositati continentali quaternari	30,6
Aree su Bisciario	42,1
Aree su Schlier	34,3
Aree su Marnoso Arenacea	32

Tabella 2.3 – pendenza media dei depositi continentali quaternari e delle aree esterne su cui affiorano le diverse formazioni

Questi dati di pendenza media, associati ai dati di pendenza media delle classi di uso del suolo (tab. 3.6), sono alla base del criterio con cui è stato estrapolato su tutto il bacino il valore della riserva idrica dei suoli (cap. 8).

2.2 – IL BACINO DEL MEDIO-ALTO FIUME METAURO

2.2.1 – Affluenti, ordine del bacino, classi di pendenza ed esposizione, fasce altimetriche e curva ipsografica

A partire da agosto 2015 sono state effettuate misure alla sezione di chiusura del bacino del medio-alto Metauro (fig. 2.19), con lo scopo di applicare il modello di bilancio fenologico a un bacino più grande e più variabile in termini di uso del suolo, litologia e coperture, impatto antropico ecc. rispetto al piccolo bacino SMA (sottobacino in sinistra idrografica del bacino maMet). A tal fine è necessaria una dettagliata mappa di uso del suolo nonché il suo aggiornamento, un prodotto che attualmente non è disponibile. È stato comunque realizzato uno studio di base sul bacino, soprattutto in funzione di una comparazione tra le misurazioni di portata relative ai due bacini, comparazione che verrà illustrata nel cap. 9. Lo studio ha interessato quei parametri che influenzano il bilancio idrogeologico: superfici proiettate e reali, pendenza, esposizione, fasce altimetriche, quota media e pendenza media, uso del suolo (non di dettaglio, Corine Land Cover), carta della vulnerabilità/permeabilità (non di dettaglio). Di seguito si riportano mappe e grafici illustranti la distribuzione in classi di questi parametri. La fig. 2.19 riporta la mappa del bacino con tutti gli affluenti e gli abitati principali (solitamente posti alla confluenza tra affluente e asta principale). La tabella 2.4 riporta tutti gli affluenti con le rispettive distanze della confluenza dalla sorgente, quota e località della confluenza, località di provenienza dell'affluente, l'ordine dell'affluente e l'ordine del Metauro dopo la confluenza.

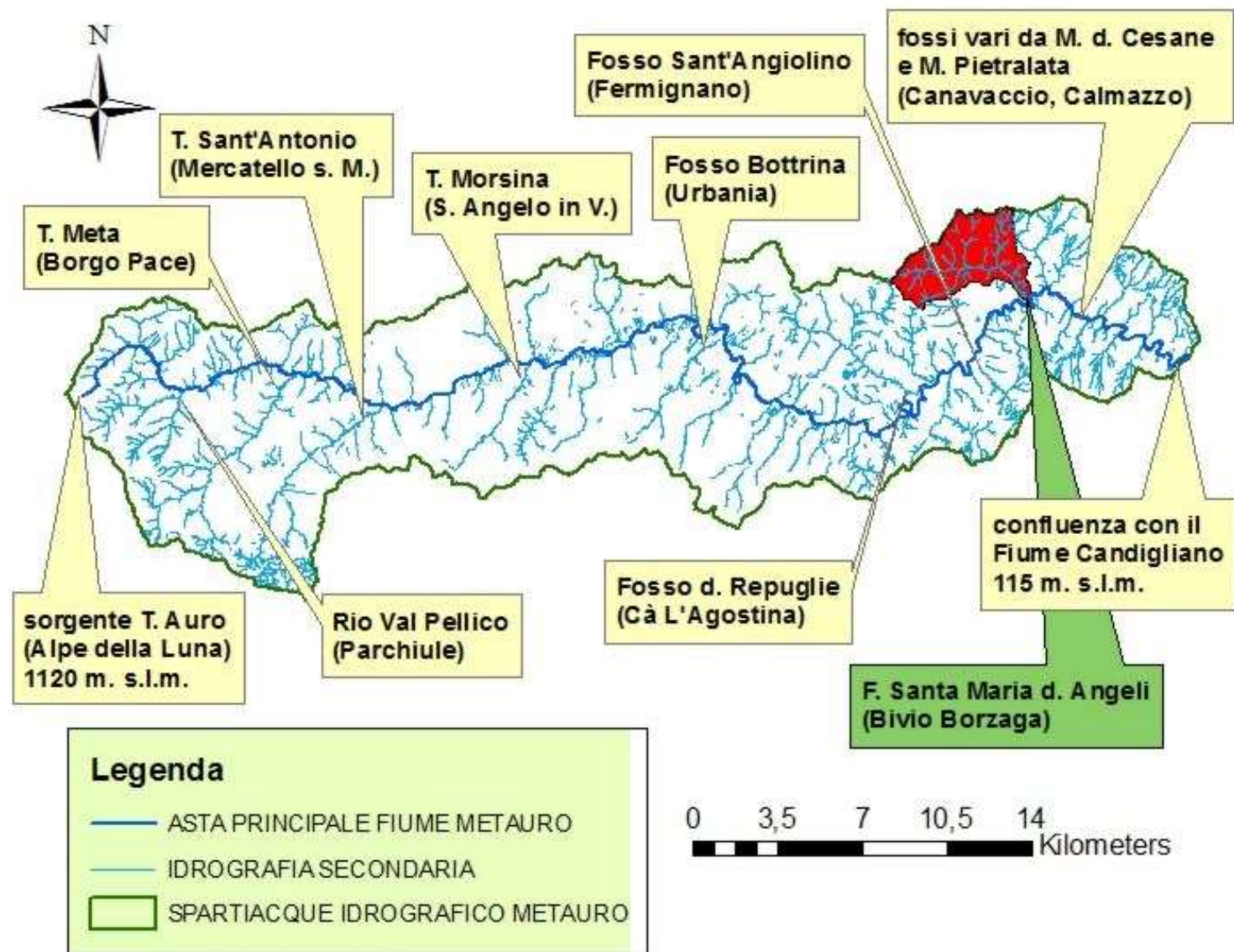


Figura 2.19 – mappa del bacino del medio-alto Fiume Metauro, con gli affluenti principali in corrispondenza dei principali abitati. Il bacino SMA è un sottobacino in sinistra idrografica del bacino principale. A Calmazzo il medio-alto Metauro si unisce al Fiume Candigliano.

n° confl.	confluenza		provenienza idrografica B	Distanza sorgente km	località	ordine A	ordine B	ordine dopo la confluenza	Quota m	monte di provenienza affluente
	A = ramo principale	B = affluente								T. Auro: nasce nell' Alpe della Luna
1	Torrente Auro (1120 m. s.l.m.)	sn	sinistra	1,3	sn	1	1	2	845	da Fonte Val della Gorga
2	Torrente Auro	sn	sinistra	3,7	C. Gorgoscuro	2	2	3	650	da M. La Breve, Poggio di Monterano e Poggio delle spine cadute
3	Torrente Auro	sn	sinistra	5	Fascineto	3	3	4	595	da Monte Bello
4	Torrente Auro	Fosso delle Cannucce	destra	5,7	Acquaviva	4	3	4	580	da M. Vallandia e Colle Quarantelle
5	Torrente Auro	Rio Val Pellico	destra	6,9	Parchiule	4	4	5	555	da M.Finocchio e M. Sodo Pulito
6	Torrente Auro	Torrente Meta	destra	12,7	Borgo Pace	5	5	6	460	da M.Romito, M. Sant'Antonio
7	Fiume Metauro	Torrente Sant'Antonio	destra	17,4	Mercatello sul M.	6	5	6	405	da Cima Le Fenaie e alt.
8	Fiume Metauro	Torrente Morsina	destra	24,9	Sant'Angelo in V.	6	3	6	350	da Monte Gottriolo
9	Fiume Metauro	sn	destra	26,8	Molino del Sasso	6	3	6	335	sn
10	Fiume Metauro	Fosso Bottrina	destra	39	Urbania	6	3	6	270	da M. Cagnero e M. Romualdo
11	Fiume Metauro	Fosso dei Fangacci	destra	49	C. Seminario	6	4	6	220	sn
12	Fiume Metauro	Fosso delle Repuglie	sinistra	54,8	Cà L'Agostina	6	5	6	205	da Col Bicchieraio
13	Fiume Metauro	Fosso Maltano	destra	56,8	Petrella	6	4	6	200	da Monte Albano e Monte L'Arcello
14	Fiume Metauro	(Sant'Angiolino)	destra	60,5	Fermignano	6	4	6	180	dal Monte Pietralata (Monte Casciara e Bregno)
15	Fiume Metauro	Fosso Santa Maria degli Angeli	sinistra	64,4	Bivio Borzaga	6	4	6	165	dal Tufo
16	Fiume Metauro	Fosso dei molinelli e Rio Marino	sinistra	65,5	S.Martino di Urbino	6	4 e 3	6	155	dalle Cesane (Monte della Conserva)
17	Fiume Metauro	Fosso della Versera	sinistra	66,9	Canavaccio	6	3	6	150	dalle Cesane (Monte Scopo)
18	Fiume Metauro	Fosso Rava	destra	68,1	sn	6	3	6	150	dal Monte Pietralata (Monte Bregno)
19	Fiume Metauro	Fosso di Cavaticci	sinistra	68,6	S.Stefano di Gaifa	6	4	6	145	dalle Cesane
20	Fiume Metauro	Fosso Sant'anna	destra	70,4	Cà Busangona-Camporotondo	6	4	6	140	dal Monte Pietralata
21	Fiume Metauro	Fosso Botroni	sinistra	71,8	Camponero	6	3	6	130	dalle Cesane
22	Fiume Metauro	Fosso della Cicogna	destra	72,1	sn	6	3	6	125	dal Monte Pietralata
23	Fiume Metauro	sn	sinistra	75,5	Calmazzo	6	3	6	120	dalle Cesane
24	confluenza col Fiume Candigliano: 75,8 km dalla sorgente (115 metri s.l.m)									

Tab. 2.4 – descrizione delle confluenze tra gli affluenti e il corso principale del medio-alto Fiume Metauro (sn = senza nome)

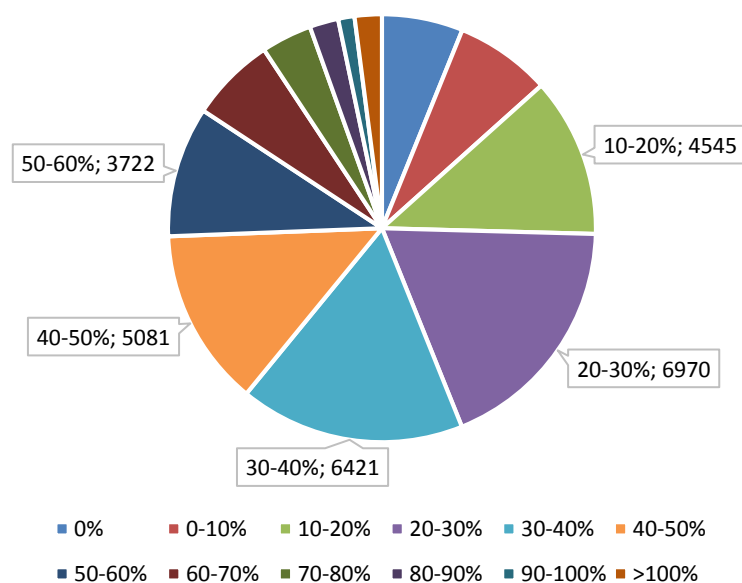


Fig. 2.20 – classi di pendenza del bacino medio-alto Metauro (aree in ettari, di fianco alla classe)

Come per il bacino SMA anche per il bacino maMet la classe maggiormente rappresentata è quella compresa tra 20 e 30% di pendenza; in modo analogo l'estensione delle superfici sopra il 40% di pendenza è molto rilevante. Come specificato per il grafico 2.12 le aree a pendenza 0% sono sovrastimate (in questo grafico comunque l'etichetta per tale classe non è stata applicata, sono circa 2300 ettari). Per la pendenza media si veda tabella 2.5.

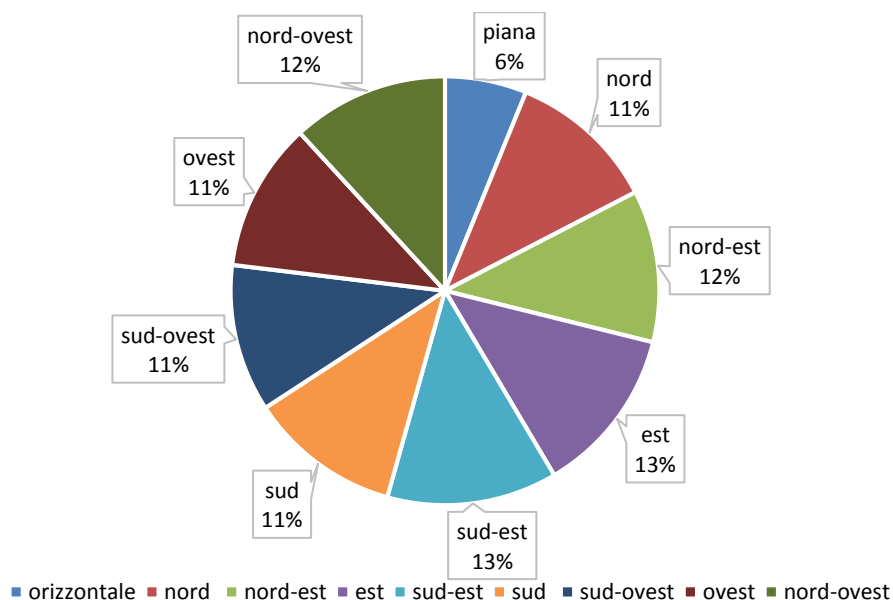


Fig. 2.21 – classi di esposizione del bacino medio-alto Metauro (% sul totale area proiettata, di fianco alla classe)

La percentuale di territorio in esposizione meridionale è pari a quella in esposizione settentrionale (35%), a dimostrare una buona simmetria dei versanti della vallata, come si può notare dalla mappa

di fig. 2.19. Come per la classe di pendenza, la classe di esposizione orizzontale o piana è sovrastimata.

Le fig. 2.22 e 2.23 riportano le aree proiettate delle fasce altimetriche e la curva ipsografica del bacino. La quota maggiore del bacino ricade nella fascia tra 250 e 450 m. s.l.m. ma la quota media è di 493 m; per il bacino SMA la fascia maggiormente rappresentata è la 300-350 (fig. 2.9) entro cui ricade la quota media del bacino “intero” (332 m). Per le fasce altimetriche si veda anche la mappa di fig. 5.7. Ottenere le fasce altimetriche è un po’ laborioso: dalla TIN occorre ricavare il raster delle quote (elevation), riclassificarlo e trasformarlo in shapefile, indi effettuare “merge” e poi “dissolve” sul raster e calcolare le aree.

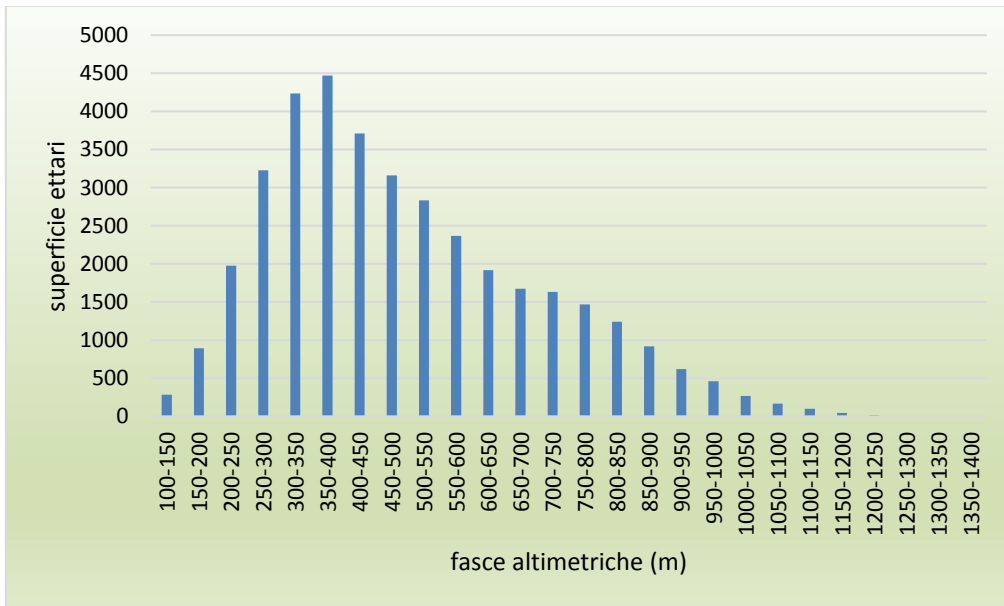


Figura 2.22 – fasce altimetriche del bacino medio-alto Metauro

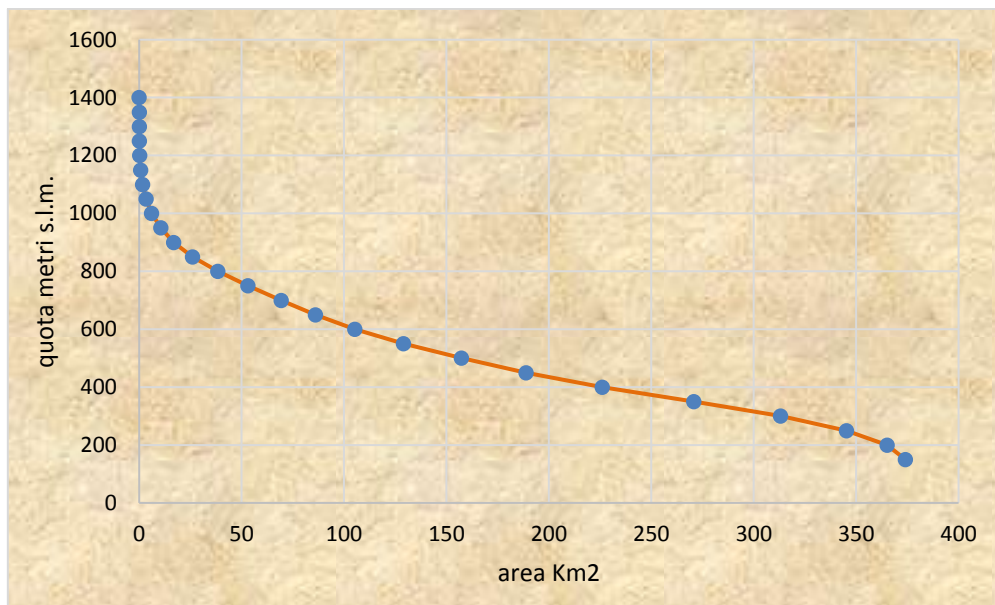


Figura 2.23 – curva ipsometrica del bacino medio-alto Metauro

Anche il bacino del medio-alto Metauro può essere considerato un bacino “maturo” (fig. 2.11).

2.2.2 – Comparazione delle caratteristiche dei territori dei bacini medio-alto Metauro e Santa Maria degli Angeli

La seguente tabella riporta la comparazione tra i due bacini oggetto di studio considerando vari parametri, tutti importanti per le dinamiche idrogeologiche. Una comparazione approfondita può venire realizzata solo mediante un accurato bilancio idrogeologico, lavoro che sarà possibile allorquando sarà disponibile per il Metauro una dettagliata mappa di uso suolo; sarebbe molto utile anche il disporre di un numero maggiore di stazioni termopluviometriche, soprattutto alle quote maggiori. All'interno del bacino sono infatti attive le 4 stazioni dell'Osservatorio A. Serpieri di Urbino, molto ravvicinate tra loro, e le stazioni di Urbino, Foresta delle Cesane, Urbania, Sant'Angelo in Vado di proprietà della Protezione Civile Marche, completamente mancando una stazione che rilevi i dati alle medio-alte quote del bacino (la Foresta delle Cesane ha una quota abbastanza elevata, 634m, ma è in una localizzazione non rappresentativa delle alte quote che si incontrano andando verso la Bocca Trabaria).

PARAMETRO	dimensione	Bacino Santa Maria degli Angeli	Bacino medio-alto Metauro
Superficie proiettata	km ²	13,097	377,3
Superficie reale	km ²	13,974	412,4
Coefficiente di acclività (superf.reale/proiettata)	adimensionale	1,067	1,094
Quota media	metri s.l.m.	336	493
Pendenza media	%	32,613	37,240
Fascia altimetrica più estesa	metri (% sul totale area)	300-350* (28,5%)	350-400 (11,5%)
Classe di pendenza più rappresentata	gradi (% sul totale area)	20-30* (28,8%)	20-30 (18,5%)
Classe di esposizione più rappresentata	adimensionale (% sul tot area)	sud-est* (16%)	sud-est + est (13% + 13%)
Lunghezza dell'asta principale	km	6,5 (7,6*)	76,8
Ordine di Strahler	adimensionale	3	6
Tempo di corrivazione	ore	1,47	12,41
Uso del suolo principale (Corine land cover 2012)	adimensionale (% sul tot area)	Boschi a prevalenza di querce caducifoglie (33,3%)	Boschi a prevalenza di querce caducifoglie (19,3%)
Classe di permeabilità massima – più estesa	adimensionale (% sul tot area)	III B – II A (4,7%) – (28,8%)	III A – II A (0,6%) – (58,2%)

Tab. 2.5 – comparazione tra i bacini Santa Maria degli Angeli (bacino ridotto) e medio-alto Metauro considerando differenti parametri

* = dati del bacino intero

La tabella 2.6 riporta le classi di vulnerabilità-permeabilità elaborate in originale dal Prof. Mariano Didero, Università di Urbino, per uno studio di vulnerabilità dei corpi idrici sotterranei, rielaborate dal Dott. Federico Biagiotti per un recente studio. Per la descrizione si rimanda al Bollettino ufficiale della Regione Marche, anno XXXI, n°38 sup. del 23 novembre 2000. Alle classi di vulnerabilità

possono essere fatte corrispondere altrettante classi di permeabilità (a maggiore vulnerabilità corrisponde maggiore permeabilità).

Classe di vulnerabilità-permeabilità	Definizione
0	Vulnerabilità trascurabile
I	Vulnerabilità scarsa
Ila	Vulnerabilità molto bassa
Ilb	Vulnerabilità bassa
IIla	Vulnerabilità medio-bassa
IIlb	Vulnerabilità media
IIlc	Vulnerabilità medio-elevata
IV	Vulnerabilità elevata

Tab. 2.6 – classi di vulnerabilità-permeabilità

Di seguito si riportano, per entrambi i bacini, le superfici (in %) corrispondenti alle varie classi. In nessuno dei due bacini sono presenti le classi di maggiore permeabilità (IIlc e IV). Questo dipende anche dalla scala del lavoro. Dalla descrizione delle classi di vulnerabilità si può asserire che i depositi alluvionali e le altre coperture (conoidi, aree in frana, ecc.) possono essere attribuite alle classi IIlb o IIlc, ma non IV che è caratteristico delle aree del Calcere Massiccio, Corniola e Maiolica (quest'ultima quando in contatto con Calcere Massiccio o con formazione intermedie che consentono una continuità idraulica, in situazione di alti strutturali).

bacino medio-alto Metauro

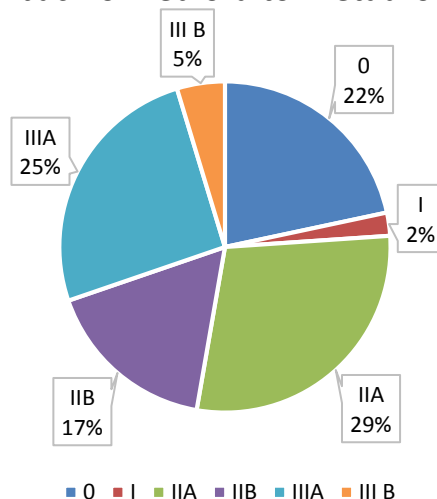


Fig. 2.24 – percentuale delle aree a diversa permeabilità per il bacino medio-alto Metauro

bacino Santa Maria degli Angeli

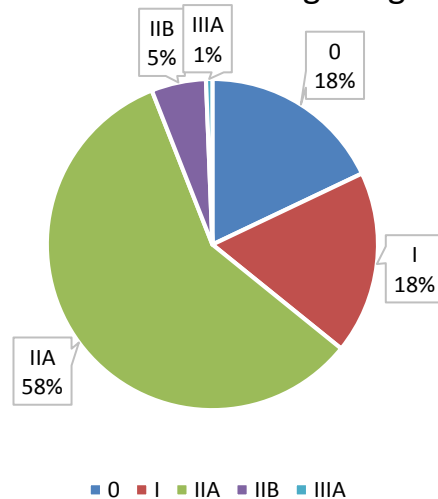


Fig. 2.25 – percentuale delle aree a diversa permeabilità per il bacino Santa Maria degli Angeli

Nella tab. 2.7 si riportano le superfici corrispondenti alle classi di uso del suolo “Corine Land Cover” IV livello. Si nota come in entrambi i bacini prevalgano le superfici boscate (querce caducifoglie), seppur con differente percentuale, uso del suolo che limita il ruscellamento e aumenta l’infiltrazione. Una percentuale importante è presente anche nelle aree miste agricole/naturali e nelle aree con colture intensive. Nel prossimo capitolo verrà analizzato l’uso del suolo a un dettaglio molto maggiore, indispensabile per i calcoli di bilancio, relativamente al bacino SMA.

La fig. 2.26 riporta la mappa di uso del suolo Corine Land Cover per il bacino medio-alto Metauro, che fornisce buone informazioni, se pur con un dettaglio inferiore a quello richiesto dal bilancio su base fenologica. Si noti la preponderanza dei seminativi nel medio bacino e delle aree boscate nelle zone a più alta quota.

La mappa di fig. 2.27 riporta la mappa della vulnerabilità-permeabilità per il bacino medio-alto Metauro, da cui sono stati ricavati i valori dei grafici 2.24 e 2.25. Si nota come le aree a maggiore permeabilità siano in corrispondenza dei depositi delle piane alluvionali (IIIA) e delle formazioni più calcaree e fratturate (IIB). Le aree a minore permeabilità sono in corrispondenza di formazioni con alternanza arenarie e marne/marne arenarie o marne e calcari.

Legenda Corine Land Cover IV livello	medio-alto Metauro	Santa Maria	% medio-alto Metauro	% Santa Maria
Praterie continue	268,4		0,7	
Praterie discontinue	144,6		0,4	
Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione	2396,8	109,2	6,4	8,3
Aree con vegetazione rada	245		0,7	
Aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici e privati	333,3		0,9	
Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti	3408,1	190,8	9,0	14,6
Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di leccio e/o sughera	228		0,6	
Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di querce caducifoglie	2,7		0,0	
Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di pini mediterranei	383,2		1,0	
Boschi misti di conifere e latifoglie a prevalenza di pini montani e oromediterranei	384,4		1,0	
Boschi a prevalenza di pini mediterranei (pino domestico, pino marittimo) e cipressete	70,3		0,2	
Boschi a prevalenza di pini montani e oromediterranei (pino nero e laricio, pino silvestre, pino loricato)	59,3		0,2	
Boschi a prevalenza di abete bianco e/o abete rosso	28,6		0,1	
Boschi a prevalenza di leccio e/o sughera	7,2		0,0	
Boschi a prevalenza di querce caducifoglie (cerro e/o roverella e/o farnetto e/o rovere e/o farnia)	12553,4	253,3	33,3	19,3
Boschi misti a prevalenza di latifoglie mesofile e mesotermofile (acero-frassino, carpino nero-orniello)	1686,4	73,2	4,5	5,6
Boschi a prevalenza di faggio	907,7		2,4	
Boschi a prevalenza di specie igrofile (boschi a prevalenza di salici e/o pioppi e/o ontani, ecc.)	86,8		0,2	
Corsi d'acqua, canali e idrovie	1,1		0,0	
Prati stabili (foraggiere permanenti)	128,9		0,3	

Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	37,6		0,1	
Colture intensive	9879,5	409,2	26,2	31,2
Colture estensive	2312,7	118,1	6,1	9,0
Sistemi colturali e particellari complessi	1536,6	135,5	4,1	10,3
Zone residenziali a tessuto continuo	14,1	14,1	0,0	1,1
Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado	585,4	6,4	1,6	0,5
totale	37690,1		1309,8	

Tab. 2.7 – superfici proiettate (in ettari) delle classi di uso del suolo Corine Land Cover IV livello 2012 relativamente ai due bacini oggetto di studio

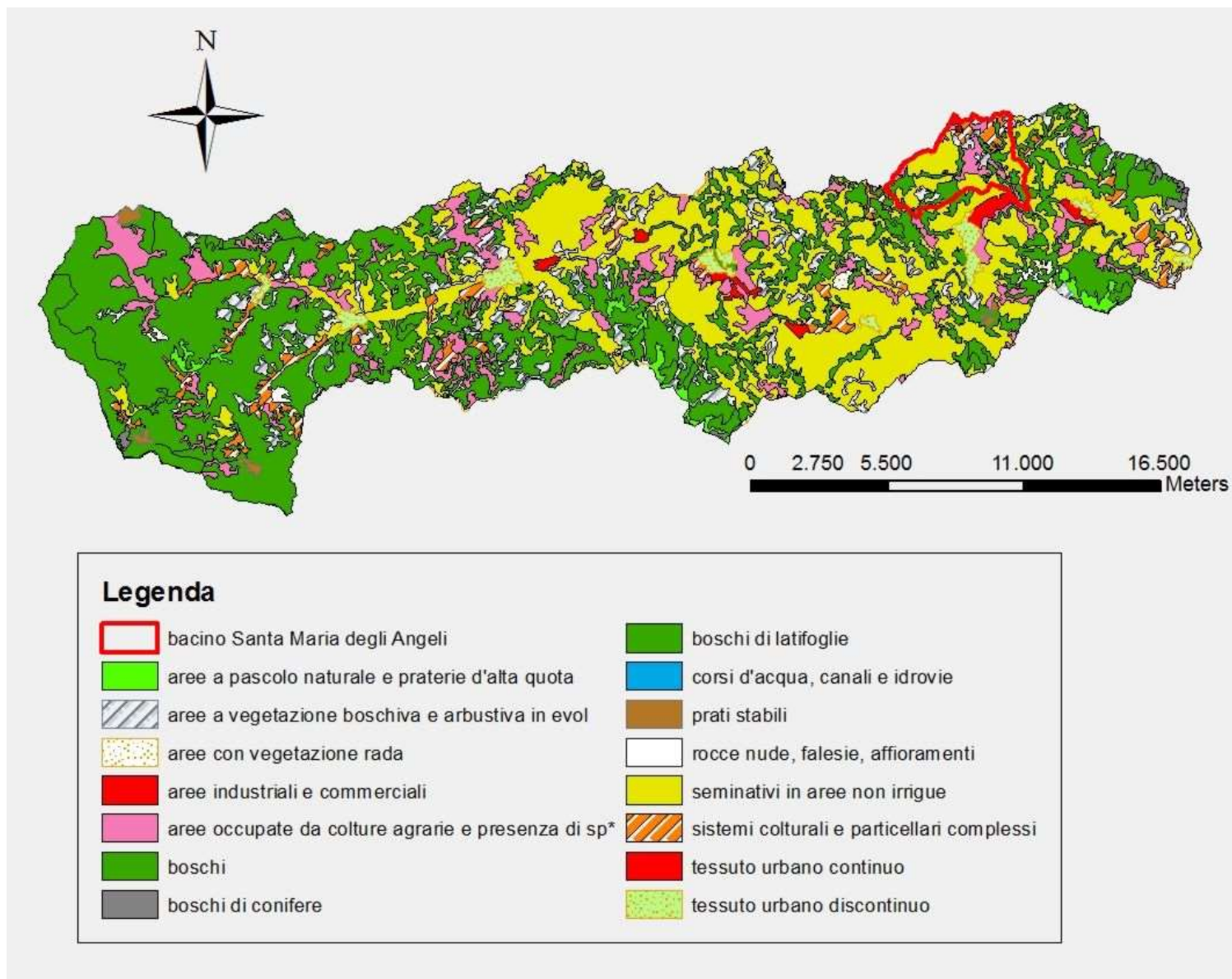


Fig. 2.26 – mappa dell'uso del suolo Corine Land Cover per il bacino medio-alto Metauro (la legenda è stata semplificata)

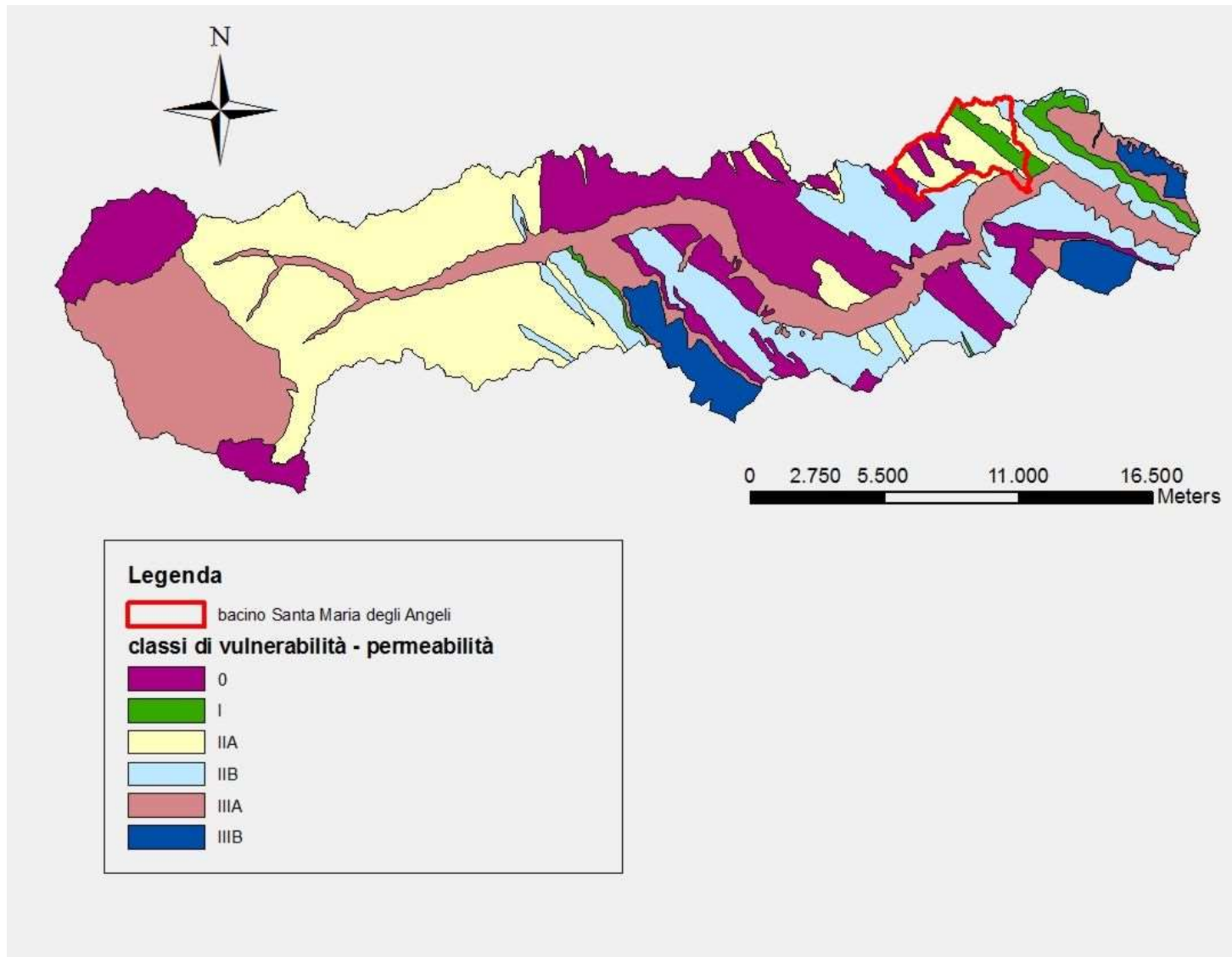


Fig. 2.27 – mappa della vulnerabilità-permeabilità per il bacino medio-alto Metauro

CAPITOLO 3 – ANALISI DELL’USO DEL SUOLO NEL BACINO SANTA MARIA DEGLI ANGELI

3.1 – LA DIFFERENZA TRA “LAND USE” E “LAND COVER”

La realizzazione di una dettagliata mappa di uso del suolo è indispensabile per un’accurata stima della evapotraspirazione potenziale, e quindi è un elemento necessario se si vuole completare in modo quanto più preciso possibile il bilancio idrogeologico su base fenologica (o più semplicemente “bilancio fenologico”). Spesso in letteratura, per descrivere l’aspetto del paesaggio e come l’Uomo interagisce con esso, si usano i termini “land use” o “land cover”: ma qual è la differenza? Per “land use” si intende come l’Uomo utilizza l’ambiente, se per sviluppo, conservazione, o usi misti. Per “Land cover” si intende quanto un determinato territorio è coperto da foreste, edificati, seminativi ecc.; di conseguenza le mappe di land cover possono essere ottenute mediante rilievo diretto o fotointerpretazione di foto aeree mentre le mappe di land use no (www.oceanservice.noaa.gov). Da quanto sopra esposto ne consegue che le mappe realizzate in questo lavoro, che descrivono le classi di uso del suolo e sono state ottenute mediante fotointerpretazione, sono mappe di land cover (o “copertura del suolo”); nonostante questo è di uso comune chiamarle “carte (o mappe) di uso del suolo” e in tal modo saranno chiamate da qua in avanti.

3.2 – LE CARTE DI USO DEL SUOLO REALIZZATE

Durante questo lavoro sono state realizzate 3 carte e 3 aggiornamenti dell’uso del suolo (con grande dettaglio); la seguente tabella riporta le mappe realizzate e gli aggiornamenti con la fonte da cui sono stati ottenuti i dati (ortofoto aeree o immagini satellitari). L’aggiornamento dei seminativi degli anni 2014 e 2015, non essendo disponibili immagini aeree, è stato realizzato interpolando i dati degli anni 2013 e 2016, considerando per ogni singolo seminativo la probabile rotazione agraria sulla base delle rotazioni agrarie comunemente attuate nel territorio.

PRODOTTO CARTOGRAFICO	ANNO	FONTE DEI DATI
Carta dell’uso del suolo	1955	Foto aeree del settembre 1955 (Volo GAI)
Carta dell’uso del suolo	1997	Ortofoto aeree 1997 (probabilmente estive)
Carta dell’uso del suolo	2013	Ortofoto aeree 2013 AGEA (probabilmente in maggio)
Aggiornamento seminativi	2014	Interpolazione dei dati 2013-2016
Aggiornamento seminativi	2015	Interpolazione dei dati 2013-2016
Aggiornamento seminativi	2016	Immagini aeree “Google Earth Pro” del 3 agosto 2016

Tab. 3.1 – prodotti cartografici di uso del suolo realizzati

Tutti i prodotti cartografici sono relativi al bacino SMA; i prodotti 2013, 2014, 2015, 2016 sono stati realizzati ai fini del bilancio fenologico mentre la mappa 1955 (iniziata in tesi specialistica e terminata in dottorato) e la mappa 1997 (già completata in tesi specialistica) sono servite per un’analisi delle variazioni di uso del suolo (cap. 3.5) considerando sempre però ciò che tali cambiamenti possono influire molto sulle dinamiche idrologiche a livello di bacino. In futuro si potrebbe applicare il bilancio anche agli anni 1955 e 1997, una volta che il bilancio abbia numerosi anni di validazione (infatti in quegli anni non ci sono misure di deflusso e non è più possibile effettuare la validazione, che può essere attuata solo in questo periodo di studio, in cui sono state messe in esercizio misure di portata). Per gli anni 2014-2015-2016 sono stati aggiornati solo i seminativi in quanto in un arco temporale breve è ciò che maggiormente cambia; per

l'aggiornamento di altri usi del suolo, come gli incolti, bosco rado, bosco, si ritiene che debbano passare almeno 5 anni.

3.3 – DESCRIZIONE DELLE CLASSI DI USO DEL SUOLO

Di seguito vengono riportate immagini e descrizione delle classi di uso del suolo 2013, le cui ortofoto sono presumibilmente di maggio. Per il 1997, essendo le ortofoto relative a un periodo dell'anno differente (estate), l'immagine per uno stesso uso del suolo è differente: ad esempio in maggio il seminativo a grano ha un colore verde scuro mentre in estate ha un colore giallo sia se il grano deve ancora essere mietuto sia se è già stato mietuto, oppure un colore marrone se il podere è stato arato. Per quanto riguarda il 1955, immagini di confronto con il 2013 sono riportate nel cap. 3.5.



Fig. 3.1 (sopra) – foto aerea e descrizione delle classi di uso del suolo “area presso edificato” ed “edificato”

Fig. 3.2 (sotto) – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “terreno a riposo”





Fig. 3.3 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “seminativo a cereali”



Fig. 3.4 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “seminativo a girasole”



Fig. 3.5 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo "seminativo a foraggio"

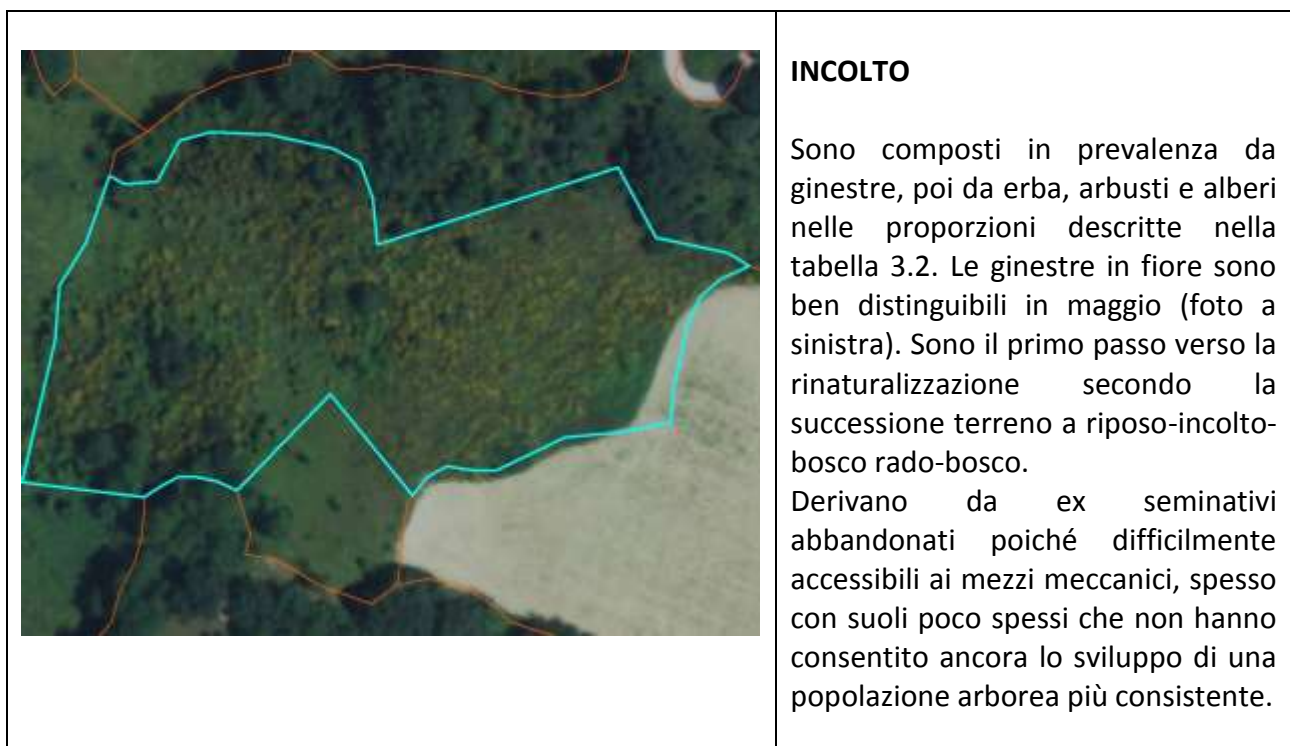


Fig. 3.6 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo "incolto"



BOSCO RADO

Sono composti per circa la metà della superficie da alberi, poi da erba, arbusti e ginestre nelle proporzioni descritte nella tabella 3.2. Sono il secondo passo verso la rinaturalizzazione secondo la successione terreno a riposo-incolto-bosco rado-bosco. Derivano da incolti che sono in via di evoluzione verso il bosco, oppure aree mai utilizzate a seminativo ma aventi pendenze e suoli poco spessi che non hanno consentito ancora lo sviluppo di una popolazione arborea più consistente (in questo caso non diverranno mai un bosco compatto e omogeneo). Possono essere anche macchie tagliate da poco al fine di produzione di legna da ardere. Infine possono essere anche rimboschimenti non maturi.



Fig. 3.7 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “bosco rado”

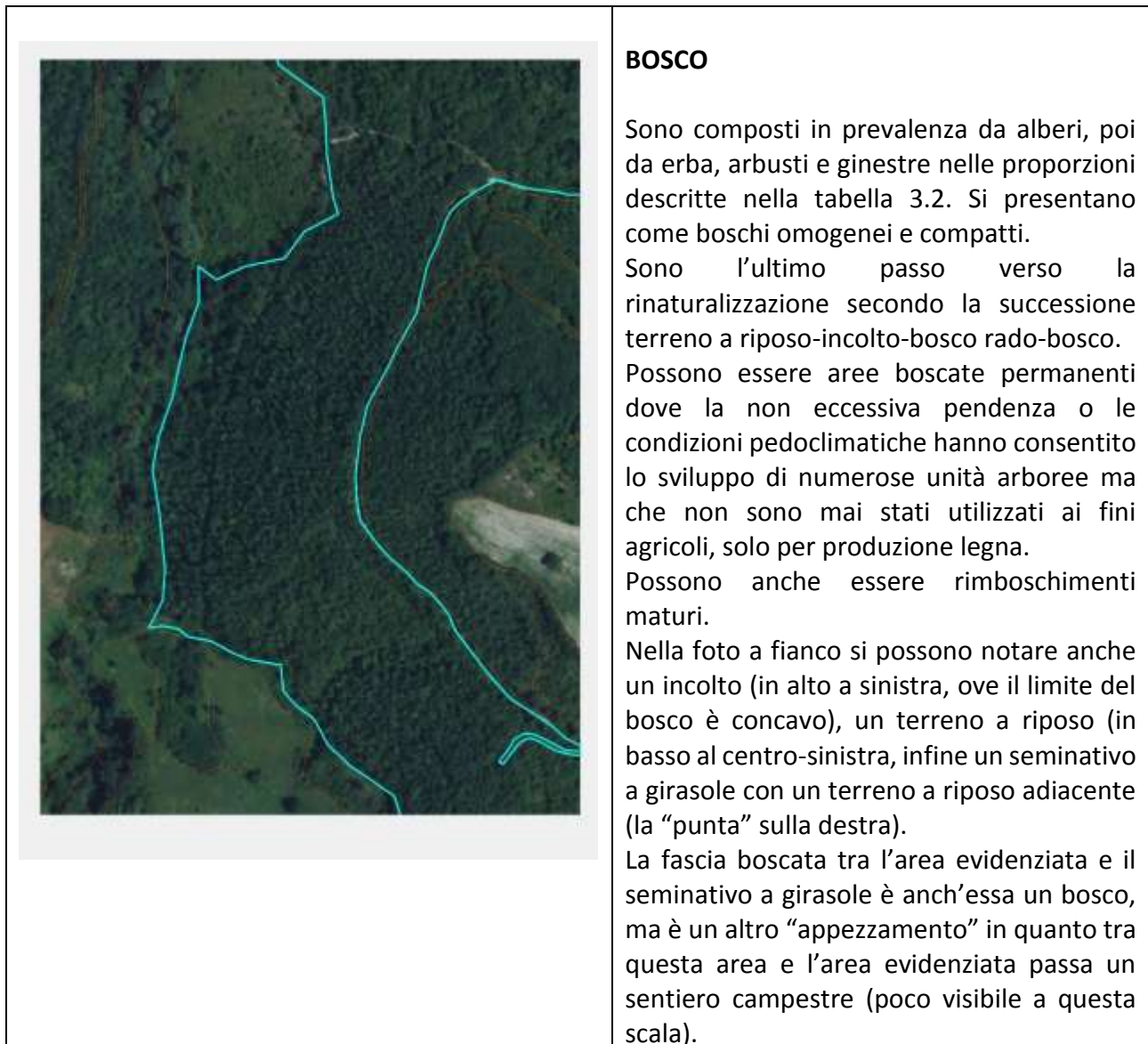


Fig. 3.8 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo "bosco"

3.4 – COMPONENTI DELLE CLASSI DI USO DEL SUOLO E SUPERFICI DELLE CLASSI/COMPONENTI NEGLI ANNI DI BILANCIO 2013, 2014, 2015, 2016

Non tutte le classi di uso del suolo hanno corrispondenti coefficienti colturali (cap.6, tab.6.5): ad esempio ne sono privi le aree in via di rinaturalizzazione (terreni a riposo, incolti, boschi radi, boschi). Per ovviare a questo inconveniente è stato necessario individuare la "composizione" delle classi mancanti attraverso delle "componenti" di cui fossero invece disponibili valori di coefficienti, o di cui non fossero disponibili presso la fonte primaria (il quaderno FAO n°56) ma che potessero essere ottenuti con fonti od osservazioni differenti. La tabella seguente riporta le componenti di uso del suolo associate alle classi, con le percentuali della presenza delle varie componenti all'interno della classe. Ad esempio, gli incolti (classe di uso del suolo) sono stimati essere composti per il 45% da erba, per il 35% da ginestre, per il 10% da piccoli alberi/arbusti, per il 10% da alberi. L'erba è un caso particolare in quanto è rappresentata dai terreni a riposo, i quali sono composti (come approssimazione) per il 50% da erba spontanea pluriennale (rappresentata dalla menta selvatica) e per il 50% da erba spontanea pluriennale (rappresentata da avena selvatica). Alcune classi corrispondono interamente con le componenti (per esempio i seminativi).

CLASSI DI USO DEL SUOLO	COMPONENTI DELLE CLASSI DI USO DEL SUOLO	% CON CUI LE COMPONENTI FORMANO LE CLASSI
Aree totalmente impermeabili	impermeabile	100%
Area presso edificato	Impermeabile	35%
	Erba	30%
	Piccoli alberi/arbusti	15%
	Alberi	20%
Seminativi a grano	Grano	100%
Seminativi a girasole	Girasole	100%
Seminativi a foraggio (erba medica)	Foraggio (erba medica)	100%
Vigneto	Vigneto (vite)	100%
Terreni a riposo (erba)	Menta	50%
	Avena	50%
Incolti	Erba	45%
	Ginestre	35%
	Piccoli alberi/arbusti	10%
	Alberi	10%
Boschi radi	Erba	20%
	Ginestre	15%
	Piccoli alberi/arbusti	15%
	Alberi	50%
Boschi	Erba	10%
	Ginestre	5%
	Piccoli alberi/arbusti	10%
	Alberi	75%

Tab. 3.2 – classi di uso del suolo e componenti delle classi di uso del suolo

Le aree totalmente impermeabili sono nella mappa suddivise in edificato, edificato produttivo, strade, ecc.

Le tabelle 3.3 e 3.4 riportano rispettivamente le superfici delle classi di uso del suolo e delle componenti delle classi, per gli anni di bilancio 2013, 2014, 2015, 2016. Ciò che varia, come prima scritto, sono le aree a seminativo (compresi i terreni a riposo) mentre le altre restano circa costanti in un range temporale così ristretto. Nel 2014 e 2015, in mancanza di foto aeree, le conduzioni dei seminativi sono state estrapolate sulla base delle comuni rotazioni agrarie della zona. Soprattutto nel 2017 (fuori bilancio), ma in parte anche nel 2015 e 2016, hanno preso piede (ma ancora a livelli molto bassi) coltivazioni di leguminose (cece, favino, trifoglio) e forse in qualche caso il coriandolo, ma queste coltivazioni non sono state considerate e se presenti sono state assimilate a uno degli altri seminativi. Le superfici delle componenti sono state ottenute a partire dalle superfici delle classi, secondo le percentuali riportate in tab. 3.2. La superficie delle componenti è fondamentale per la determinazione dei coefficienti colturali poiché è a loro che i coefficienti sono assegnati; poi attraverso la composizione delle classi determinano i coefficienti delle classi (che ne sarebbero privi).

	SUPERFICIE PROIETTATA IN ETTARI			
CLASSE DI USO DEL SUOLO	2013	2014	2015	2016
Aree totalmente impermeabili	76	76	76	76
Area presso edificato	42	42	42	42
Seminativi a grano	121	268	118	227
Seminativi a girasole	132	49	163	16
Seminativi a foraggio (erba medica)	218	157	164	197
Vigneto	17	17	17	17
Terreni a riposo	82	82	108	113
Incolti	71	69	67	68
Boschi radi	92	92	96	96
Boschi	456	456	456	456

Tab. 3.3 – superficie proiettata delle classi di uso del suolo nei 4 anni di bilancio

	SUPERFICIE PROIETTATA IN ETTARI			
COMPONENTE DELLE CLASSI DI USO DEL SUOLO	2013	2014	2015	2016
Impermeabile	91	91	91	91
Grano	121	268	118	227
Girasole	132	49	163	16
Foraggio (erba medica)	218	157	164	197
Vigneto	17	17	17	17
Avena	95	95	108	110
Menta	95	95	108	110
Ginestre (<i>Spartium junceum</i>)	61	61	61	61
Piccoli alberi/arbusti	73	73	73	73
Alberi (querce)	403	403	405	405

Tab. 3.4 – superficie proiettata delle componenti di uso del suolo nei 4 anni di bilancio

3.5 – ANALISI DELLE VARIAZIONI DI USO DEL SUOLO ATTRAVERSO LE CARTE 1955 – 1997 - 2013

La tabella 3.5 riporta le superfici proiettate delle classi di uso del suolo 1955 – 1997 – 2013. Nel 1955 era presente il seminativo misto (fig. 3.9), podere suddiviso in piccoli appezzamenti (spesso divisi da filari di viti) in cui venivano fatte diverse coltivazioni. In effetti i vigneti erano quasi assenti nel 1955 in quanto il vino era prodotto da filari, sparsi quasi ovunque, come si vede dalla grande superficie dei seminativi a filari, poi crollata nel 1997-2013 poiché molti filari erano di intralcio alle macchine agricole. Pur essendo scomodi rispetto ad un vigneto, consentivano di trattenere il terreno e limitare l'erosione, e rendevano meno gravosi gli eventi precipitativi estremi. Il 1955 presentava comunque un territorio molto più scoperto con quasi 1000 ettari di seminativi, contro i circa 600 degli altri due periodi. Il progressivo abbandono dei seminativi a maggiore pendenza ha portato all'aumento delle aree "in via di rinaturalizzazione": incolto, bosco rado e in parte bosco. La tab. 3.6 riporta la pendenza media dei seminativi e delle aree in via di rinaturalizzazione. Nel 1997 e poi nel 2013 sono aumentati gli edificati e si è vista la comparsa dei terreni a riposo (1997) e dei seminativi a girasole (2013), questi ultimi comunque già coltivati negli anni '90 (seppure ancora con poca estensione).

CLASSI DI USO DEL SUOLO	Area in ettari		
	1955	1997	2013
Edificato	23	34	36
Zone miste edificate e naturali	30	48	48
Strade	45	39	40
Seminativo a cereali	287	230	118
Seminativo a foraggio	196	168	224
Seminativo misto*	472	/	/
Seminativo a girasole**	/	/	133
Vigneto	1	17	17
Terreno a riposo	/	185	87
Incolto***	67	94	72
Bosco rado***	/	120	92
Bosco	219	405	473
Affioramento di roccia	6	2	2
Dettaglio seminativi			
Seminativi con filari ^	446	27	16
Seminativi semplici (senza filari)	509	558	550
Totale seminativi	955	585	565
Totale aree semi-naturali e naturali (incolti, boschi radi, boschi) in buona parte derivanti da abbandono delle aree agricole più impervie	285	619	637

* Non presente nel 1997 e 2013

** Non presente nel 1955 e 1997, è stato introdotto negli anni '80-'90

*** nel 1955 incolto e bosco rado sono assieme (67 ettari)

^ nel 1997 e nel 2013 ci sono anche "incolti con filari" (sono ex coltivi)

Tab. 3.5 – superficie proiettata delle classi di uso del suolo negli anni 1955-1997-2013

Principali classi di uso del suolo 1997	Pendenza media (%)	Pendenza media (°)	Coefficiente di acclività
Seminativi	24	14	1,031
Terreno a riposo	27	15,1	1,036
Incolto	37	20,3	1,066
Bosco rado	39	21,3	1,073
Bosco	44	23,7	1,092

Tab. 3.6 – pendenza media dei principali uso del suolo 1997, con coefficiente di acclività

La tabella 3.6 conferma quanto sopra scritto: sono state abbandonate le aree più pendenti, e gli usi del suolo "in via di rinaturalizzazione" (terreno a riposo – incolto – bosco rado – bosco) hanno una pendenza progressivamente maggiore, a dimostrare che le aree a maggiore pendenza sono state abbandonate per prime (o mai utilizzate come seminativi, come la maggior parte delle aree boscate). Questa distribuzione delle pendenze, unita alla distribuzione delle pendenze dei depositi quaternari (tab. 2.3), sono alla base della spazializzazione della riserva idrica dei suoli (cap. 8). Il coefficiente di acclività (Ca) è pari al rapporto tra superficie reale/proiettata; in questo caso viene

ricavato dalla pendenza media poiché è direttamente correlato con essa. Il Ca può venire utilizzato per correggere le superfici proiettate ed ottenere le superfici reali.

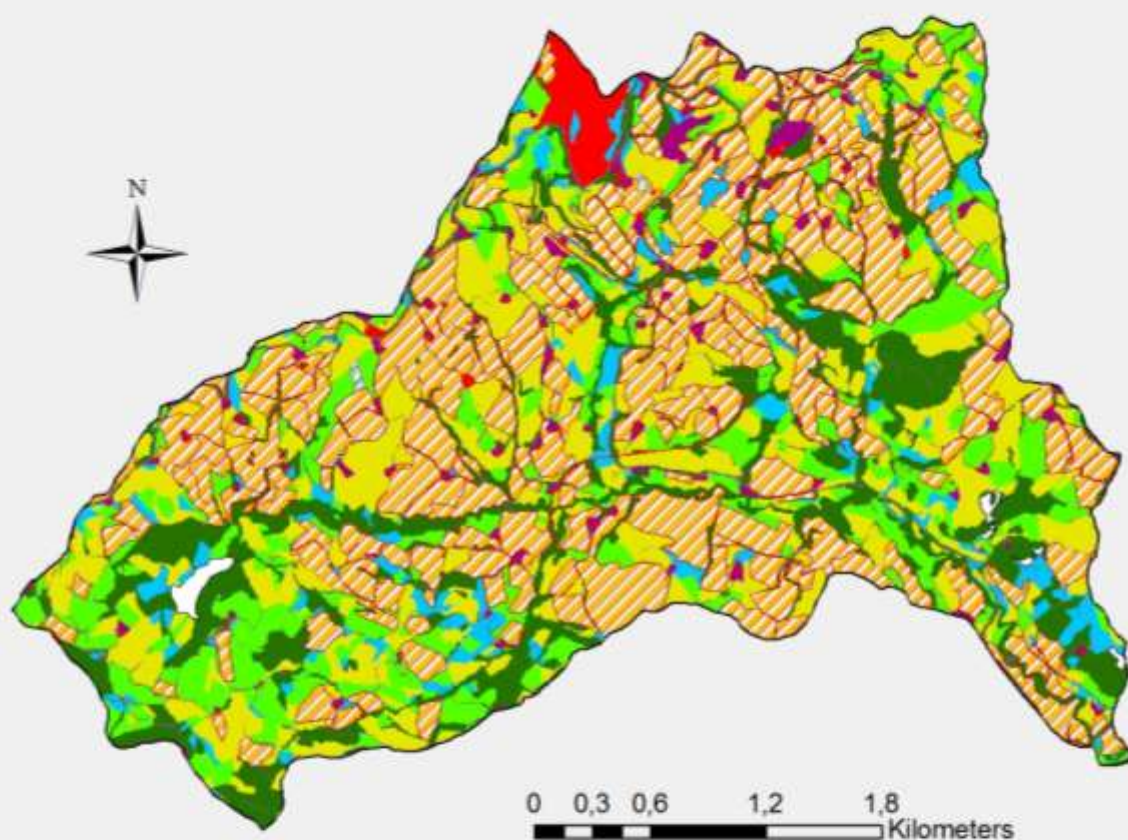
La fig. 3.9 riporta 3 doppie immagini di confronto 1955-1997. Nel 1955 si possono notare i seminativi misti (fasce di differente colore) con intercalati i filari di viti, completamente scomparsi nel 2013 (ma già da molto tempo prima). Soprattutto nella prima foto si nota il cambiamento del pattern delle strade: nel tempo molte sono scomparse o hanno visto deviare il loro tracciato, oppure sono state fatte strade nuove. Nel passaggio dei due anni sono anche notevolmente aumentate le aree a bosco o bosco rado, più evidente nella seconda e terza coppia di foto.

Le fig. 3.10, 3.11 e 3.12 riportano infine le tre mappe di uso del suolo. Anche in questo caso si nota la grande presenza di seminativi misti nel 1955, e terreni a riposo con seminativi di girasole (oltre a grano ed erba medica) nel 2013; il girasole non è presente nel 1997. Si nota anche il recupero di incolti, boschi radi, boschi.

Fig. 3.9 – comparazione di porzioni di territorio 1955-2013

Anno 1955	Anno 2013
<p data-bbox="236 277 707 315">Via Biancalana (presso strada rossa)</p> 	
<p data-bbox="288 837 655 875">Convento di San Bernardino</p> 	
<p data-bbox="421 1413 523 1451">Cerreto</p> 	

CARTA DELL'USO DEL SUOLO 1955

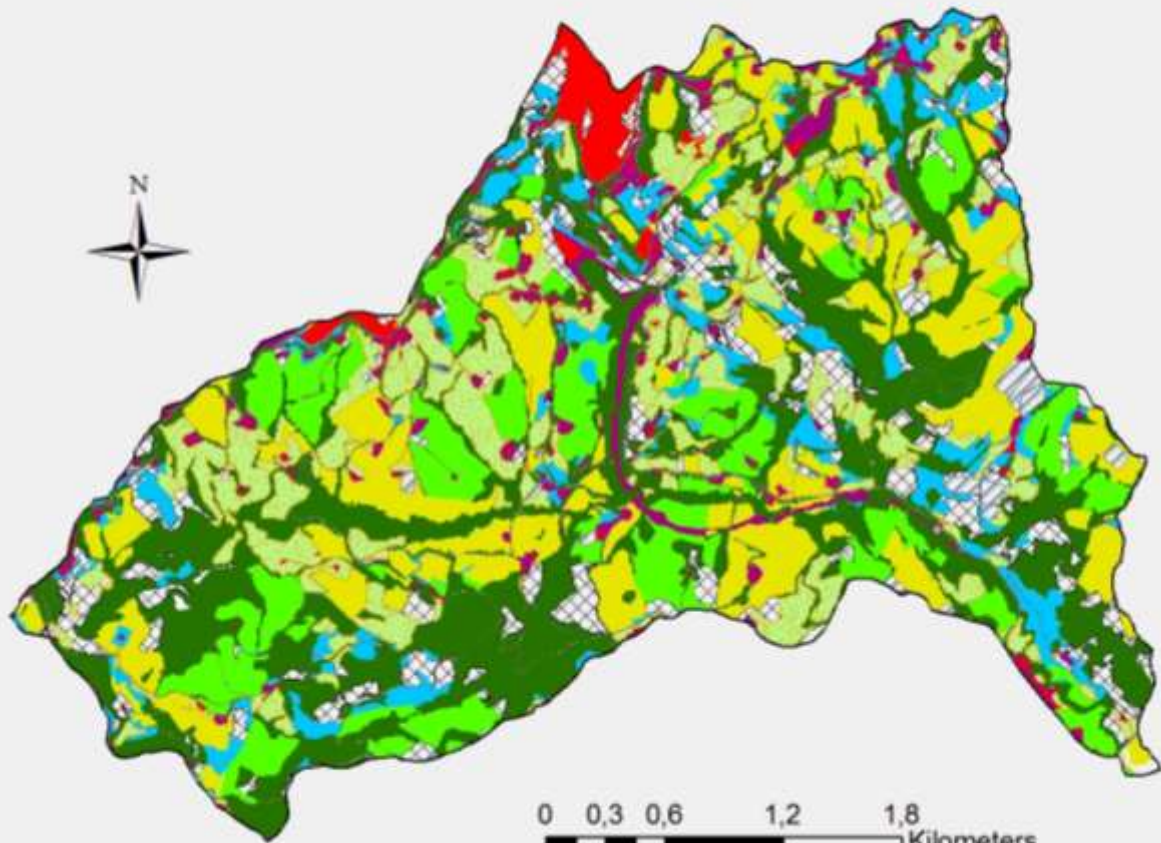


Legenda

affioramento di roccia	seminativo a foraggio
edificato	seminativo misto
zone miste edificate e naturali	vigneto
strade principali e campestri	incolto e bosco rado
seminativo a cereali	bosco

Fig. 3.10 – carta di uso del suolo 1955

CARTA DELL'USO DEL SUOLO 1997

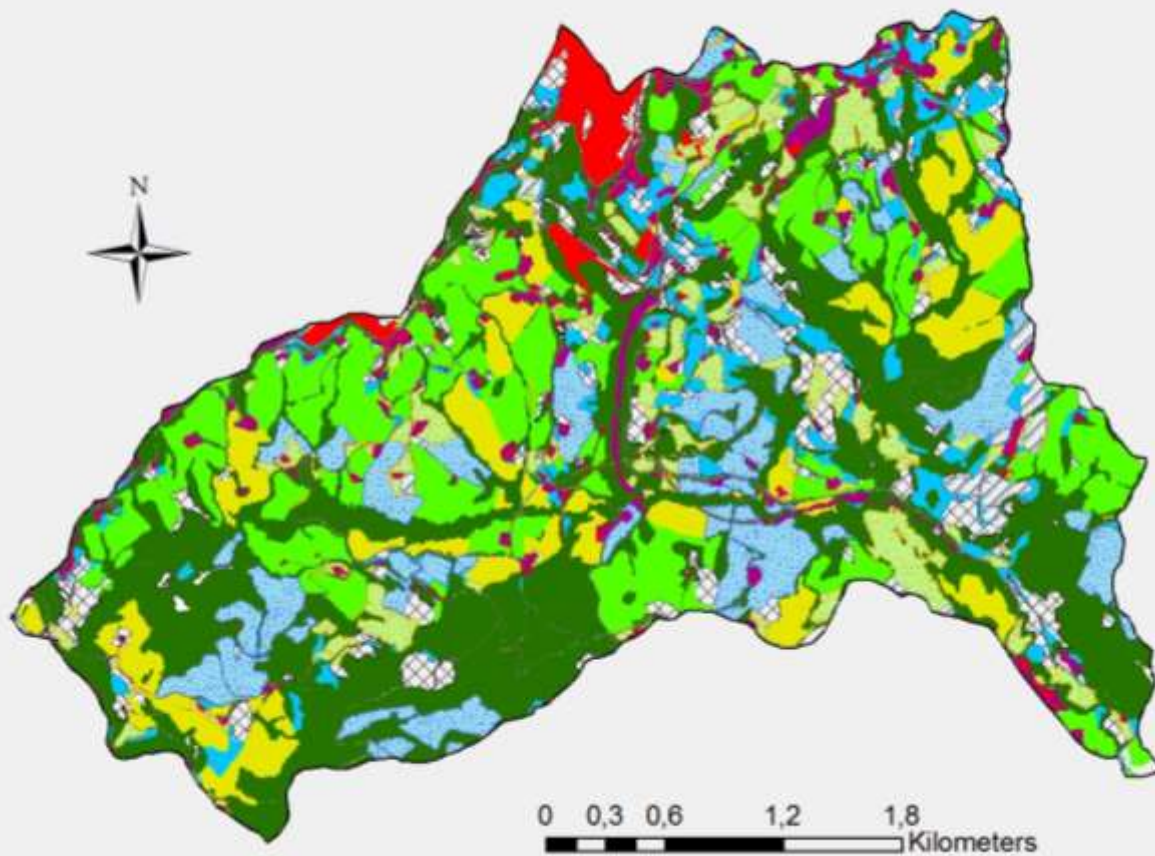


Legenda

 affioramento di roccia	 vigneto
 edificato	 terreno a riposo
 zone miste edificate e naturali	 incolto
 strade	 bosco rado
 seminativo a cereali	 bosco
 seminativo a foraggio	

Fig. 3.10 – carta di uso del suolo 1997

CARTA DELL'USO DEL SUOLO 2013



Legenda

	affioramento di roccia		seminativo a girasole
	edificati		vigneto
	zone miste edificate e naturali		terreno a riposo
	strade		incolto
	seminativo a cereali		bosco rado
	seminativo a foraggio		bosco

Fig. 3.10 – carta di uso del suolo 2013

CAPITOLO 4 – IL BILANCIO IDROGEOLOGICO SU BASE FENOLOGICA

4.1 – GENERALITA' SUL CICLO IDROGEOLOGICO

L'acqua di precipitazione che cade in un determinato territorio può avere differenti destini (fig. 4.1):

- evapotraspirazione: evaporazione dal suolo e dalle superfici + traspirazione delle piante;
- ruscellamento: scorre in superficie e raggiunge il reticolo idrografico;
- deflusso ipodermico: scorre nelle coperture come i suoli e raggiunge, più lentamente, il reticolo idrografico;
- infiltrazione: l'acqua si infila in profondità e alimenta le falde acquifere; con l'apporto di acqua e quindi con l'innalzarsi delle falde acquifere l'acqua di infiltrazione viene drenata dal reticolo idrografico ed esce dal bacino sotto forma di deflusso di base.

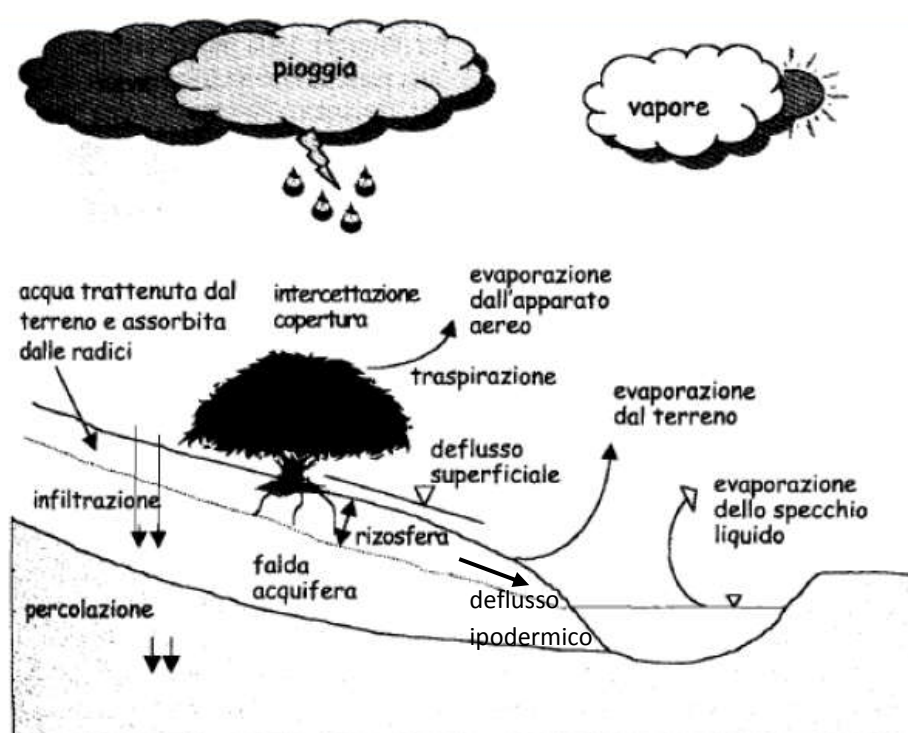


Fig. 4.1 – il ciclo idrologico con le varie componenti del bilancio

Il bilancio idrogeologico consiste proprio nell'analizzare, in termini quantitativi, il destino dell'acqua nel territorio considerato comparando le entrate e le uscite di acqua. Il territorio può essere un bacino o un'area differente come un ambito amministrativo (per esempio un territorio comunale). Nel caso del bacino l'acqua di precipitazione è quella che cade entro i limiti dello spartiacque superficiale; a volte però, come spesso accade nei terreni carsificati, lo spartiacque superficiale non coincide con quello sotterraneo (il bacino idrografico non coincide con il bacino idrogeologico, fig. 4.2, immagini 1 e 2): in questo caso l'acqua che entra nel bilancio deriva anche da parte delle precipitazioni che si infiltrano all'esterno del bacino e che riemergono nel bacino stesso; altresì l'acqua che si infila nel bacino in esame può uscire dallo stesso e alimentare il deflusso di un altro bacino (fig. 4.2, immagine 1).

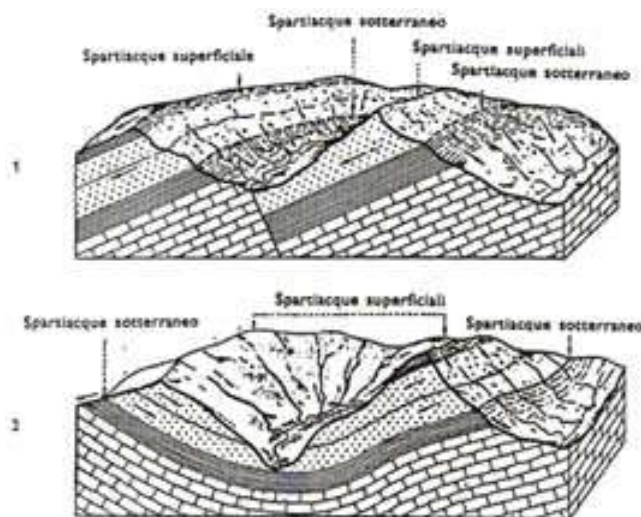


Fig. 4.2 - non coincidenza tra bacino idrografico e bacino idrogeologico per l'assetto strutturale e la permeabilità delle formazioni rocciose presenti

Può anche capitare di operare in una porzione di territorio che comprenda solo una parte di bacino idrografico. In questo caso occorre considerare anche ciò che arriva dal corso d'acqua prima di entrare nel territorio (fig. 4.3); importante può essere anche il flusso di sub-alveo (l'acqua di falda presente nei depositi alluvionali entro cui scorre il corso d'acqua; tale acqua ha velocità bassa ma si distribuisce in una sezione ampia).



Fig. 4.3 – Afflussi e deflussi in un territorio differente dal bacino (ad esempio un territorio comunale)

Nel bilancio occorre considerare anche le entrate/uscite di origine antropica. Nel presente lavoro si è visto che gli afflussi esterni derivano da acqua dell'acquedotto che viene scaricata nel bacino dopo essere passata nel depuratore (cap. 9.1). Uscite di origine antropica possono essere ad esempio acqua che viene prelevata a scopo irriguo/potabile da un invaso, dalle falde o dal corso d'acqua all'interno del bacino e portata all'esterno del bacino stesso: nel caso si effettuino misure delle

portate del corso d'acqua occorre tenerne conto (ma non è il caso del bacino Santa Maria degli Angeli)

4.2 – EQUAZIONE “CLASSICA” DI BILANCIO IDROGEOLOGICO

L'equazione del bilancio idrogeologico può essere relativa a un anno specifico o all'anno medio: una media ottenuta da 30 anni di osservazioni è il livello ottimale (AdB Fiume Magra, 2014). Un bilancio così ottenuto è definito “bilancio pluriennale”.

4.2.1 – Il bilancio annuale

Il bilancio idrogeologico completo di una data area può essere espresso da (Pranzini ,2009):

$P + As + Au + Ai = ETR + D + I + Du + Ae$	(equazione 4.1)
--	-----------------

ove:

P = precipitazioni

ETR = evapotraspirazione reale

I = infiltrazione

D = deflusso totale (il deflusso è formato dall'acqua di ruscellamento e dall'acqua che si infiltra e riemerge, ossia il deflusso di base, in questo caso ci sono altri apporti)

con le voci aggiuntive:

As = afflussi di superficie

Au = afflussi di sottosuolo

Ai = acqua importata da aree contigue (mediante tubi o canali)

Du = deflussi di sottosuolo

Ae = acqua esportata verso aree contigue

Se si considera il deflusso totale una parte del deflusso è dovuto a parte dell'acqua di infiltrazione che riemerge (deflusso di base).

Se ci si riferisce al bacino idrografico, e in assenza di apporti/esportazioni esterne, il bilancio (mensile, annuale o per ogni evento di pioggia) diviene:

$P = ETR + I + R$	(equazione 4.2)
-------------------	-----------------

in cui:

P = precipitazioni (giornaliere, mensili, annuali)

ETR = evapotraspirazione reale

I = infiltrazione

R = ruscellamento

I termini I e R li ritroviamo nel deflusso misurato al corso d'acqua. L'acqua di ruscellamento scorre lungo la superficie e giunge al reticolo idrografico da dove esce dal bacino. Comprende anche quell'acqua che si infiltra nel suolo e scorre lungo i terreni fino a raggiungere il reticolo (deflusso ipodermico), non quindi l'acqua che si infiltra nel sottosuolo e alimenta le falde acquifere.

L'acqua d'infiltrazione dapprima ricostituisce la riserva idrica del suolo se questa non è ai massimi, indi va ad alimentare le falde acquifere (percolazione profonda): le riserve sotterranee così aumentano negli anni piovosi e diminuiscono in quelli asciutti. In tal modo il bilancio annuale può non chiudersi in pareggio. Parte dell'acqua infiltrata riemerge nello stesso anno:

- in forma diffusa (acquittrini);
- alle sorgenti;
- sotto forma di *deflusso di base* ovvero il corso d'acqua drena la falda acquifera e porta fuori dal bacino parte delle acque sotterranee. Anche corsi d'acqua minori possono drenare falde minori e portare tale acqua al corso principale. L'acqua delle sorgenti e degli acquitrini poi può raggiungere a sua volta il reticolo (scorrendo in superficie) e contribuire al deflusso di base, ma non sempre nello stesso anno. In periodi lontano dalle precipitazioni, quindi allorché anche il deflusso ipodermico si è esaurito, tutta la portata del corso d'acqua è data dal deflusso di base. Le **misure di portata** realizzate alla sezione di chiusura del bacino sono servite proprio a stimare il deflusso di base, mentre l'acqua di ruscellamento è stata stimata con il metodo *curve number* (USDA, 1972, e successive modifiche e adattamenti).

4.2.2. – Il bilancio pluriennale

Tutta l'acqua che piove segue le tre direzioni indicate dall'equazione 4.2. Se consideriamo un anno medio pluriennale (30 anni per esempio), allora tutta l'acqua che si infiltra prima o poi riemerge e viene portata via sotto forma di deflusso di base: in tal modo sia il termine "infiltrazione" che il "ruscellamento" scompaiono dal bilancio, e l'equazione diviene:

$P = ETR + D$	(equazione 4.3)
---------------	-----------------

Ove D = deflusso totale, = somma del deflusso di base (pari all'infiltrazione totale degli anni considerati) + ruscellamento

4.3 – IL BILANCIO IDROGEOLOGICO GIORNALIERO SU BASE FENOLOGICA

4.3.1 – Limiti dell'approccio tradizionale al bilancio idrogeologico

L'equazione 4.3 è adatta a studi climatici di lungo periodo e può fornire buone stime delle risorse idriche medie di un territorio, ma non ha la precisione richiesta per stimare le risorse idriche in un range temporale annuale o a scala temporale ancor maggiore. Il deflusso infatti ingloba tutta l'infiltrazione (che si distribuisce tra la variazione della riserva idrica dei suoli e la percolazione profonda).

Quando aumenta la scala temporale di calcolo occorre tenere in considerazione anche i giorni in cui non piove; in quei giorni il ciclo idrogeologico prosegue, poiché l'acqua è fornita dalla riserva idrica del suolo. Modelli mensili consentono di effettuare bilanci abbastanza accurati, ad esempio stimando la evapotraspirazione potenziale (ETP) con la formula di Thornthwaite & Mather (Thornthwaite C.W., Mather J.R., 1957), e la evapotraspirazione reale (ETR) considerando la variazione di riserva idrica del suolo (sempre utilizzando una formula dei due autori appena citati). Si veda ad esempio il bel lavoro dell'autorità di bacino del Fiume Magra (2014). Al termine dell'anno

la riserva idrica si ricostituisce. Il bilancio non può essere applicato a scala giornaliera per i seguenti motivi:

- 1) poiché non riesce a modellare tutte le fluttuazioni all'interno della riserva idrica e i momenti in cui c'è ruscellamento ed in cui c'è percolazione profonda; la riserva può aumentare di un tot in un giorno e diminuire di un'altra quota in un altro;
- 2) il "surplus" (e quindi il ruscellamento + percolazione profonda) del bilancio di T&M avviene solo quando la riserva si è ricostituita il che è una forzatura; infatti il ruscellamento può avvenire anche in mesi estivi in cui la riserva è quasi vuota, in occasione di eventi precipitativi molto intensi; inoltre il modello, nel surplus, non distingue tra ruscellamento e percolazione profonda;
- 3) altra forzatura è assumere che, finché la riserva non si è ricostituita, tutta l'acqua di precipitazione in eccesso (non consumata dalla ETP) vada a ricostituire la riserva: anche in questo caso è la stima del parametro ruscellamento a risentirne.

Altri limiti dei tradizionali modelli di bilancio sono che:

- le precipitazioni e l'evapotraspirazione potenziale non vengono corrette secondo la reale superficie del territorio (Coefficiente di acclività, cap. 5);
- la evapotraspirazione potenziale considera l'uso del suolo omogeneo (a prato di Festuca, in ottime condizioni idriche) e non considera l'effettivo uso del suolo, come invece accade nella stima della ETP in ambito agrario per il dosaggio dell'acqua di irrigazione.

Un aspetto del modello di bilancio di T&M è il fatto che gli autori, nell'equazione della riserva idrica, abbiano ritenuto irrealistico un completo prosciugamento della riserva (che quindi non scende mai a zero), cosa che invece è simulato nel modello di bilancio fenologico.

4.3.2 – I principi e i parametri del bilancio: modello concettuale e bilancio idrologico del suolo

Per quanto sopra descritto ci si è posti l'obiettivo di modellare un bilancio in grado di simulare in maniera quanto più precisa possibile le dinamiche idriche a livello di bacino. Ne è risultato un modello di bilancio che presenta le seguenti novità:

- utilizzo del coefficiente di acclività (Ca) per la correzione delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione potenziale;
- applicazione a scala di bacino dei coefficienti colturali (Kc) utilizzati in ambito agrario per la stima della richiesta dell'acqua di irrigazione: ciò ha comportato ricerca per trovare durate delle fasi fenologiche e valori di coefficienti adatti a classi di uso del suolo non agrarie (cap. 6). Si è considerato così l'effettivo uso del suolo nelle sue fasi fenologiche annuali. Il parametro modificato è stata l'evapotraspirazione potenziale che era già stata corretta con il Ca.

La modellazione a scala giornaliera ha consentito di avere ulteriore precisione nei risultati e consente di simulare al meglio anche i giorni in cui non ci sono precipitazioni. Il modello di bilancio si sovrappone ed integra una valutazione delle dinamiche idriche del suolo e prende spunto da quanto indicato nel quaderno FAO n°56 (Allen et. al., 1998) che è stato anche la fonte principale dei Kc. Ovviamente il quaderno FAO n°56 non ha pensato a tale bilancio per un uso a livello di bacino, ma solo per le aree agricole. Rispetto al modello FAO sono stati introdotti due nuovi parametri che spiegano ulteriormente le dinamiche idriche nel suolo.

Nell'iter che ha portato alla modellazione del bilancio sono stati fatti numerosi tentativi per trovare le giuste approssimazioni nella stima dei vari parametri (uno per tutti il ruscellamento), in modo che nell'anno di calibrazione 2013 ci fosse corrispondenza tra i valori e i trends del parametro "percolazione profonda" e il deflusso ottenuto dalle misurazioni di portata a Bivio Borzaga. Per "corrispondenza" si intende quanto sarà spiegato nel cap. 10.

Di seguito vengono riportati 5 periodi dell'anno 2014 in cui vi sono variazioni "significative" dei parametri del bilancio. Il termine "significativo" sta ad indicare non la magnitudine della variazione ma il tipo di variazione. L'obiettivo è spiegare come lavora il modello. Nella tabella 4.1 sono spiegati i parametri anche se, per il dettaglio di come sono stati calcolati, si rimanda ai prossimi capitoli.

I parametri che concorrono, mediante una stima delle dinamiche idriche del suolo, alla valutazione del bilancio fenologico giornaliero sono:

Parametro	Spiegazione	Capitolo di riferimento
ET0a	evapotraspirazione calcolata secondo il metodo Penman Monteith, corretta per il coefficiente d'acclività	5
Kc bac	coefficiente colturale unico a livello di bacino	6
ETc	evapotraspirazione potenziale colturale (= ET0a*Kc bac)	6
TAW	Riserva idrica massima disponibile dei suoli (total available water)	8
p	Parametro che serve a calcolare la RAW (è funzione della ETc giornaliera)	8
RAW	Riserva idrica massima facilmente disponibile dei suoli (rapidly available water) (=p*TAW)	8
DR, i start	Deficit della riserva idrica all'inizio del giorno i-esimo (=DR, i end del giorno precedente, se ha valore negativo viene azzerata)	presente
DR, i end	Deficit della riserva idrica alla fine del giorno i-esimo =(ETc+DR, i start)-(Pa-RO); quando è negativa c'è DP di pari valore e corrisponde ad AAW-TAW	presente
Pa	precipitazioni pesate secondo l'inverso del coefficiente di acclività	5
RO	Ruscellamento ottenuto in modo indipendente con il metodo curve number (modellazione in continuo)	7
AAW	Riserva idrica del suolo nel giorno considerato, actual available water (=TAW-DR, i end). Non può eccedere la TAW; se supera il valore di TAW c'è DP di pari valore (ed è pari al valore negativo di DR, i end)	presente
Ks	Coefficiente da stress idrico =(TAW-DR, i end)/(TAW-RAW)	6
ETcR	Evapotraspirazione reale colturale (=ETc*Ks)	6
DP	Percolazione profonda (deep percolation) (=AAW-TAW, avviene quando AAW>TAW e significa che la riserva del suolo è satura)	presente
ΔR	Variazione nella riserva idrica del suolo = bilancio giornaliero dei parametri = Pa-RO-ETcR-DP	presente

Tab. 4.1 – I parametri del bilancio idrogeologico giornaliero su base fenologica

Si è cercato di utilizzare i termini in italiano, ma si è scelto di lasciare alcuni con il loro originale acronimo in inglese. I parametri AAW e ΔR sono stati introdotti in questo lavoro.

Il concetto che sta alla base del metodo è il consueto bilancio entrate/uscite del nostro volume di suolo (in questo caso rappresentativo del volume di suolo dell'intero bacino, fig.4.4). In ogni giorno dell'anno le entrate di acqua al sistema sono date da:

- precipitazioni
- acqua disponibile nella riserva idrica del suolo

Quali vie segue l'acqua per uscire? Le seguenti:

- Ruscellamento (solo in caso di una certa entità delle precipitazioni, è calcolato in modo indipendente dal bilancio del suolo e così non è una incognita)
- Evapotraspirazione reale (avviene sempre tranne quando, nello stesso giorno, non ci sono precipitazioni e la riserva idrica è esaurita, ovvero il $K_s = 0$)
- Percolazione profonda (avviene quando piove, la riserva è saturo, e il ruscellamento e la ETcR non esauriscono la quota di acqua precipitata)

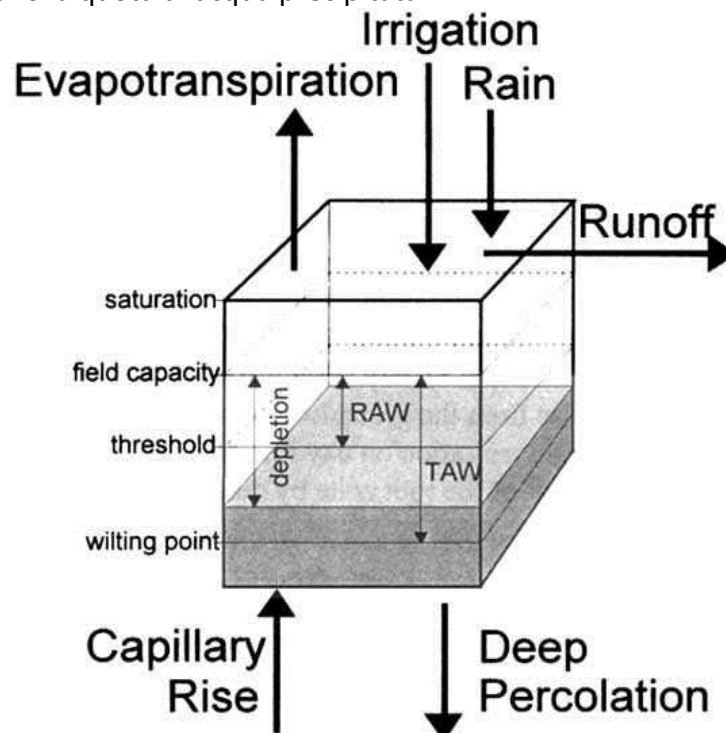


Fig. 4.4 – modello di bilancio idrico del suolo utilizzato. Non è stata considerata la risalita capillare e non c'è irrigazione

4.3.3 – Esempio di applicazione del bilancio: analisi di 6 periodi significativi dell'anno 2014

Il parametro ΔR , ovvero la variazione della riserva idrica del suolo, altro non è che il bilancio giornaliero dei parametri ovvero:

entrate-uscite = precipitazioni – (ruscellamento + evapotraspirazione reale + percolazione profonda). Se ΔR ha valore positivo, la riserva aumenta; se ΔR ha valore negativo, la riserva diminuisce: questo avviene quando:

- non piove e la riserva deve compensare fornendo l'acqua per la ETcR (che è la via "preferenziale" dell'acqua, il ruscellamento e la percolazione profonda vengono in subordine); ad esempio il 18 gennaio della tabella 4.3;
- piove, ma l'acqua viene totalmente consumata dalla ETcR: ad esempio il 19 gennaio della tabella 4.3;

Dopo aver riportato la legenda dei colori di celle e numeri delle tabelle seguenti, si passa all'analisi dei 6 periodi significativi.

Legenda colori	Spiegazione
	I parametri che vanno confrontati al fine di comprendere se c'è stress idrico
	Il deficit idrico del suolo (D_r , i start) si azzerà poiché la riserva è satura (AAW) e c'è percolazione profonda (DP) il giorno prima
2,06	Richiesta di evaporazione (dai suoli) + traspirazione (dalle piante) del bacino
	Acqua di pioggia
	Acqua di ruscellamento
144,7	Valore in eccesso della riserva (AAW): c'è percolazione profonda (DP) pari al valore in azzurro meno TAW
	Percolazione profonda (DP)
-2,06	Valore di diminuzione della riserva idrica (ΔR)
	Il momento in cui il deficit idrico del suolo al termine del giorno (D_r , i end) supera l'acqua facilmente disponibile (RAW): c'è stress idrico e $K_s < 1$. Allora la $ET_{cR} < ET_c$
0,96	Il valore del K_s scende al di sotto di 1: allora la ET_c non viene soddisfatta né dalla pioggia né dalla riserva e $ET_{cR} < ET_c$
129,5	Il deficit idrico del suolo (D_r , i end) ha raggiunto il suo massimo, ovvero il valore di TAW. La riserva idrica (AAW) è completamente esaurita, c'è stress idrico totale e $K_s = 0,00$ così come la ET_{cR} , la DP e la ΔR
	Il momento in cui il deficit idrico del suolo al termine del giorno (D_r , i end) rientra al di sotto dell'acqua facilmente disponibile (RAW): termina lo stress idrico e $K_s = 1$. Allora la $ET_{cR} = ET_c$. Quando si ricostituirà la riserva si avrà di nuovo percolazione profonda

Tab. 4.2 – legenda esplicativa dei colori utilizzati nelle tabelle di esempio (applicazione del bilancio)

1° periodo: primi giorni di percolazione profonda

Partiamo nella nostra analisi dal 18 gennaio 2014 (tab. 4.3). In quel giorno abbiamo 1,97 mm di ET_{0a} ; la ET_0 è stata calcolata con il metodo Penman Monteith, indi corretta per il coefficiente di acclività del bacino. Il coefficiente colturale unico del bacino (K_c bac) è di 1,05: ne deriva che la ET_c (evapotraspirazione massima colturale) è di 2,06 mm: questo è quanto evaporerebbe e traspirerebbe nel bacino se ci fosse acqua a sufficienza: è questo il caso oppure c'è carenza idrica? Proseguiamo nell'analisi dei parametri. TAW è il contenuto di acqua, in mm, della riserva satura utilizzabile dalle piante, ed è pari a 129,5 mm (per il 2014, varia di anno in anno in funzione della distribuzione nel bacino della profondità media delle radici). Parte di quest'acqua però non è facilmente disponibile dalle piante, poiché in profondità o poiché legata più fortemente alle particelle del terreno: per stimare quanta dell'acqua è facilmente disponibile entra in gioco il parametro p : moltiplicato per la TAW ci dà il valore richiesto, ovvero la RAW. Il parametro p varia giornalmente ma per non avere eccessivi sbalzi della RAW si è adottata una media mensile: di conseguenza la RAW cambia ogni mese. Torniamo alla richiesta di acqua, ovvero ai 2,06 mm: come

possono essere soddisfatti? Il 18 gennaio non c'è pioggia, quindi a questa risorsa non si può attingere: è quindi la riserva idrica che deve sopperire. Il valore reale della riserva, giorno per giorno, è dato dal parametro AAW e parte da 129,5; ne consegue che alla riserva vengono tolti 2,06 mm e scende a 122,4. Perché questo valore? Noi non abbiamo visto i primi 18 giorni dell'anno: che cosa è successo? In questi giorni, per un motivo o per l'altro, il valore della riserva è sceso di 5,01 mm: è questo il valore di DR, i start che rappresenta il deficit idrico della riserva all'inizio del 18 gennaio. Quindi la riserva scende da (129,5-5,01) di 2,06 mm, ovvero giunge a 122,4 mm. Il deficit idrico al termine del giorno, DR, i end, sale di 2,06 mm ovvero passa da 5,01 a 7,07 mm. Riescono le piante per la loro traspirazione a prendere facilmente questi 2,06 mm (che comprendono anche la evaporazione dal suolo, nota bene)? La risposta è sì, poiché il deficit idrico al termine del giorno, 7,07 mm, è inferiore all'acqua facilmente disponibile, la RAW (88,3 mm). Allora tutta la richiesta d'acqua può venire soddisfatta: infatti al ETcR è pari alla ETc e non c'è stress idrico, infatti il valore di Ks è pari a 1. Non c'è ruscellamento in quanto non c'è pioggia, non c'è percolazione profonda in quanto la riserva è sotto il massimo e non c'è acqua in eccesso, il valore di ΔR è negativo poiché la riserva idrica è calata di 2,06 mm, che è anche il bilancio giornaliero dei parametri (tab. 4.1).

Passiamo al 21 gennaio 2014; quel giorno c'è stata una precipitazione di buona entità: 24,2 mm, di cui 0,9 sono andati in ruscellamento. Restano quindi 23,3 mm a disposizione. La richiesta evapotraspirativa del giorno è di 0,42 mm (ETc): ne consegue che l'acqua di pioggia può tranquillamente fornire tale ammontare, e scende a circa 22,9 mm. Non c'è quindi stress idrico, Ks =1 (infatti Dr, i end è ampiamente sotto RAW, anzi è negativo) e la ETcR corrisponde con la ETc. Questi 22,9 mm di surplus, una volta soddisfatta la domanda di ET, possono andare a rimpinguare la riserva: quanto è il deficit della riserva all'inizio del giorno? Il valore è di 7,67 mm (Dr, i start); allora tolti questi mm il surplus è di circa 15,2 mm. Il valore della riserva quindi eccede il massimo (TAW, 129,5 mm) di 15,2 mm (arriva a 144,7) ma non può trattenere questa acqua in eccesso: il ruscellamento è già stato calcolato, quindi ne derivano 15,2 mm che vanno in percolazione profonda. Ritroveremo questi 15,2 mm dopo qualche tempo (mesi è l'ordine temporale del bacino) prima nelle falde acquifere, quindi nel flusso d'acqua alla sezione di chiusura del bacino (deflusso di base). Il valore di ΔR è positivo pari all'ammontare dell'acqua richiesta per saturare la riserva (7,67 mm). Il valore di deficit idrico della riserva al termine del giorno è azzerato, anzi è negativo di un ammontare pari all'acqua di precipitazione in eccesso. Allora il deficit di partenza del giorno dopo (22 gennaio) si azzerava in quanto non può essere negativo, e la riserva AAW riparte da 129,5 mm (in tabella ha valore di 128,8 perché il modello già calcola quanta acqua ha fornito per soddisfare la richiesta di ETc (0,83 mm) del 22 gennaio, che l'acqua di pioggia non riesce interamente a compensare.

Valore di partenza TAW: **129,5 mm**

Data	ET0a	Kc bac	ETc	TAW	p	RAW	Dr, i start	Dr, i end	Pa	RO	AAW	Ks	ETcR	DP	ΔR
18/01/2014	1,97	1,05	2,06	129,5	0,682	89,1	5,01	7,07	0,0	0,0	122,4	1	2,06	0,0	-2,06
19/01/2014	1,54	1,05	1,61	129,5	0,682	89,1	7,07	7,24	1,4	0,0	122,3	1	1,61	0,0	-0,17
20/01/2014	0,89	1,05	0,93	129,5	0,682	89,1	7,24	7,67	0,5	0,0	121,8	1	0,93	0,0	-0,43
21/01/2014	0,40	1,05	0,42	129,5	0,682	89,1	7,67	-15,21	24,2	0,9	144,7	1	0,42	15,2	7,67
22/01/2014	0,80	1,05	0,83	129,5	0,682	89,1	0,00	0,71	0,1	0,0	128,8	1	0,83	0,0	-0,71
23/01/2014	0,85	1,05	0,89	129,5	0,682	89,1	0,71	0,50	1,1	0,0	129,0	1	0,89	0,0	0,20
24/01/2014	0,83	1,05	0,86	129,5	0,682	89,1	0,50	-12,22	13,7	0,2	141,7	1	0,86	12,2	0,50
25/01/2014	1,41	1,05	1,47	129,5	0,682	89,1	0,00	1,41	0,1	0,0	128,1	1	1,47	0,0	-1,41
26/01/2014	0,72	1,05	0,76	129,5	0,682	89,1	1,41	2,17	0,0	0,0	127,3	1	0,76	0,0	-0,76
27/01/2014	0,83	1,05	0,87	129,5	0,682	89,1	2,17	-0,24	3,3	0,0	129,7	1	0,87	0,2	2,17
28/01/2014	0,43	1,05	0,45	129,5	0,682	89,1	0,00	-1,52	2,0	0,0	131,0	1	0,45	1,5	0,00

Tab. 4.3 – un periodo del bilancio 2014: inizio della percolazione profonda

2° periodo: primi giorni di stress idrico

La riserva idrica (AAW) si sta rapidamente consumando, data l'assenza di precipitazioni. Il 22 maggio termina l'acqua facilmente disponibile (RAW) e il deficit idrico al termine del giorno (Dr, i end) è maggiore della RAW per la prima volta dall'inizio dell'anno: inizia lo stress idrico. Ks assume valore <1 e la richiesta di evaporazione e traspirazione (ETc) non viene più soddisfatta: la evapotraspirazione effettiva (ETcR) è inferiore a quella richiesta.

data	ET0a	Kc bac	ETc	TAW	p	RAW	Dr,i start	Dr, i end	Pa	RO	AAW	Ks	ETcR	DP	ΔR
19/05/2014	3,72	1,00	3,74	129,5	0,546	70,8	53,15	56,89	0,0	0,0	72,6	1	3,74	0,0	-3,74
20/05/2014	4,48	1,01	4,50	129,5	0,546	70,8	56,89	61,39	0,0	0,0	68,1	1	4,50	0,0	-4,50
21/05/2014	5,54	1,01	5,58	129,5	0,546	70,8	61,39	66,97	0,0	0,0	62,5	1	5,58	0,0	-5,58
22/05/2014	6,00	1,01	6,04	129,5	0,546	70,8	66,97	73,01	0,0	0,0	56,5	0,96	5,81	0,0	-5,81
23/05/2014	3,50	1,01	3,52	129,5	0,546	70,8	73,01	76,54	0,0	0,0	53,0	0,90	3,18	0,0	-3,18
24/05/2014	6,25	1,01	6,29	129,5	0,546	70,8	76,54	82,83	0,0	0,0	46,7	0,79	4,99	0,0	-4,99
25/05/2014	4,31	1,01	4,34	129,5	0,546	70,8	82,83	86,98	0,2	0,0	42,5	0,72	3,14	0,0	-2,95

Tab. 4.4 – un periodo del bilancio 2014: inizio dello stress idrico

3° periodo: esaurimento della riserva idrica del suolo

Siamo in giugno e la riserva è oramai ai minimi termini. Il deficit idrico è costantemente maggiore dell'acqua facilmente disponibile, il Ks ha un valore bassissimo e solo una minima parte della richiesta di evaporazione e di traspirazione del terreno e delle colture/erbe/arbusti/piante del bacino viene soddisfatta ($ETcR \ll ETc$), lo stress idrico è grande. Il 9 giugno la riserva si esaurisce e non c'è più acqua disponibile: il bacino è come "bloccato" dalla siccità. Il deficit è massimo e assume valore pari alla riserva (129,5 mm nel 2104). È questa un'eventualità non prevista dal modello mensile di Thornthwaite & Mather che non prevede il completo esaurimento della riserva, probabilmente a ragione; ma anche nel modello T&M l'acqua che resta è talmente poca che l'effetto è circa lo stesso. Ovviamente questo è un dato rappresentativo del comportamento del bacino nel suo insieme, poi ci sono variabilità territoriali e se in un sito la riserva si è esaurita ad esempio non il 9 giugno ma il 5 giugno, in un altro magari si è esaurita il 20 giugno e così via.

La percolazione profonda è ovviamente pari a 0, ma non è un evento tipico di questo periodo poiché può avvenire in qualunque giorno dell'anno.

data	ET0a	Kc bac	ETc	TAW	p	RAW	Dr,i start	Dr, i end	Pa	RO	AAW	Ks	ETcR	DP	ΔR
06/06/2014	5,73	1,02	5,82	129,5	0,501	65,4	106,45	112,27	0,0	0,0	17,2	0,27	1,55	0,0	-1,55
07/06/2014	5,90	1,02	6,00	129,5	0,501	65,4	112,27	118,27	0,0	0,0	11,2	0,17	1,04	0,0	-1,04
08/06/2014	6,04	1,02	6,14	129,5	0,501	65,4	118,27	124,41	0,0	0,0	5,1	0,08	0,48	0,0	-0,48
09/06/2014	6,23	1,02	6,34	129,5	0,501	65,4	124,41	129,5	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00
10/06/2014	6,20	1,02	6,32	129,5	0,501	65,4	129,50	129,5	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00

Tab. 4.5 – un periodo del bilancio 2014: esaurimento della riserva idrica del suolo

4° periodo: fluttuazioni della riserva attorno al minimo nei mesi estivi

Durante i mesi estivi la riserva non resta sempre ai minimi. Le precipitazioni di 1,5 mm del 09 luglio e di 0,5 mm del 10 luglio non riescono a fare risalire la riserva in quanto la domanda evapotraspirativa nei due giorni (ETc) è molto alta; dato che la riserva resta ai minimi anche il Ks resta a 0 (si veda la tab. 4.2 per i parametri che lo determinano) e la ETcR è pari a 0 nonostante le precipitazioni. Tuttavia i 2 mm piovuti in due giorni non scompaiono ma entrano nella quota di bilancio relativa alla variazione di riserva ΔR e li ritroveremo nelle somme di fine anno. Questo appare un po' una forzatura: l'acqua c'è ma non viene utilizzata per la ETcR, viene vista come variazione positiva della riserva ma la riserva resta ai minimi. Questo accade perché, affinché il Ks si scosti dallo 0 (e quindi ci sia $ETcR > 0$), per il modello occorre che la riserva non sia ai minimi (e questo è congruente). Perché questo accada occorre che la pioggia del giorno (tolto l'eventuale ruscellamento) sia almeno di poco superiore alla richiesta ETc; se lo è, allora la riserva sale di quel poco, Ks diviene >0 e c'è ETcR ma a una quota molto bassa poiché Ks è basso. Probabilmente questo processo, sebbene possa sembrare in alcune sue parti lacunoso, serve a considerare la estrema difficoltà nel fornire acqua utile alla ETcR in mesi caratterizzati da una forte siccità.

Non appena c'è una precipitazione di una certa consistenza (13 e 14 luglio) viene fornita un po' di acqua alla riserva e quindi Ks risale un poco. Di conseguenza anche la ETcR si scosta dal valore 0 anche se rappresenta solo una minima parte della richiesta evapotraspirativa ETc. Ovviamente non c'è ruscellamento. Pochi giorni dopo, in assenza di precipitazioni, la riserva torna ai minimi.

data	ET0a	Kc bac	ETc	TAW	p	RAW	Dr,i start	Dr, i end	Pa	RO	AAW	Ks	ETcR	DP	ΔR
09/07/2014	6,25	0,79	4,91	129,5	0,520	72,3	Dr, i end	129,5	1,50	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	1,50
10/07/2014	3,09	0,78	2,40	129,5	0,520	72,3	129,50	129,5	0,50	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,50
11/07/2014	4,71	0,77	3,61	129,5	0,520	72,3	129,50	129,5	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
12/07/2014	6,26	0,75	4,72	129,5	0,520	72,3	129,50	129,5	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
13/07/2014	3,55	0,73	2,59	129,5	0,520	72,3	129,50	125,94	6,15	0,00	3,6	0,06	0,15	0,00	6,00
14/07/2014	3,20	0,73	2,34	129,5	0,520	72,3	125,94	113,41	14,87	0,00	16,1	0,26	0,61	0,00	14,26
15/07/2014	4,31	0,73	3,14	129,5	0,520	72,3	113,41	116,49	0,06	0,00	13,0	0,21	0,66	0,00	-0,59
16/07/2014	5,79	0,82	4,77	129,5	0,520	72,3	116,49	121,26	0,00	0,00	8,2	0,13	0,63	0,00	-0,63
17/07/2014	6,02	0,82	4,96	129,5	0,520	72,3	121,26	126,23	0,00	0,00	3,3	0,05	0,26	0,00	-0,26
18/07/2014	6,09	0,82	5,02	129,5	0,520	72,3	126,23	129,5	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
19/07/2014	6,24	0,82	5,14	129,5	0,520	72,3	129,50	129,5	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 4.6 – un periodo del bilancio 2014: fluttuazione della riserva attorno al minimo nei mesi estivi

5° periodo: inizio della risalita stabile della riserva e fine dello stress idrico

In questo periodo incomincia la risalita stabile della riserva con le prime consistenti piogge che riescono in entrambi gli obiettivi, fornire acqua per la domanda di ET del territorio (ETc) e fornire acqua per la ricostituzione stessa. Il 01 settembre è il giorno del 2014 in cui accade e la riserva non tornerà più ai suoi livelli minimi, fino al corrispondente periodo del 2015. Il 01 settembre varia anche il valore del parametro p e quindi aumenta la quota di acqua facilmente disponibile; la notevole precipitazione del 01 settembre fa sì che il Ks passi da 0 a quasi 1, per poi passare a 1 il giorno successivo. In un paio di giorni quindi termina un severissimo stress idrico e la ETcR passa da 0 ad un valore pari a ETc; è certamente un periodo molto singolare, dovuto a tre eventi coincidenti: una forte precipitazione, il fine-mese che comporta il cambiamento del parametro p, un calo della ET0 ai primi di settembre (per cause meteo-climatiche). Nel 2013 questo periodo dura una settimana,

nel 2015 otto giorni, nel 2016 circa un mese; il Ks però, come abbiamo visto nel 4° periodo, ha dei momenti di risalita anche nei mesi estivi. La variazione della riserva ΔR presenta valori positivi, ma già al primo giorno senza precipitazioni la riserva viene intaccata nuovamente e ΔR è negativo (05 settembre). Ma ormai il trend è in aumento.

data	ET0a	Kc bac	ETc	TAW	p	RAW	Dr,i start	Dr, i end	Pa	RO	AAW	Ks	ETcR	DP	ΔR
30/08/2014	4,63	0,86	3,98	129,5	0,515	73,8	129,50	129,5	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00
31/08/2014	4,87	0,86	4,19	129,5	0,515	73,8	129,50	129,5	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00
01/09/2014	1,79	0,86	1,54	129,5	0,609	81,7	129,50	83,03	52,4	4,4	46,5	0,92	1,42	0,0	46,60
02/09/2014	1,25	0,86	1,07	129,5	0,609	81,7	83,03	72,86	11,2	0,0	56,6	1	1,07	0,0	10,17
03/09/2014	1,04	0,86	0,90	129,5	0,609	81,7	72,86	71,85	1,9	0,0	57,7	1	0,90	0,0	1,01
04/09/2014	1,29	0,86	1,11	129,5	0,609	81,7	71,85	63,06	9,9	0,0	66,4	1	1,11	0,0	8,79
05/09/2014	2,54	0,86	2,18	129,5	0,609	81,7	63,06	65,24	0,0	0,0	64,3	1	2,18	0,0	-2,18

Tab. 4.7 – un periodo del bilancio 2014: inizio della risalita stabile della riserva e fine dello stress idrico

6° periodo: ritorno alla fase di ruscellamento e di percolazione profonda

Nei mesi autunnali, specialmente in novembre, le precipitazioni fanno risalire la riserva idrica. A un certo punto le precipitazioni iniziano a generare ruscellamento, e questo può avvenire anche se la riserva non è satura. Quando la riserva va in eccesso idrico c'è percolazione profonda: la ritroviamo dopo mesi. Il ruscellamento può avvenire anche in mesi estivi quando la riserva è ai minimi o quasi, anche se occorre molta acqua: la percolazione profonda no. Non appena le precipitazioni sono di minore entità o assenti (20-21 novembre in tabella 4.7) ecco che la riserva scende di nuovo, come è anche denotato dalla variazione negativa di ΔR . Tuttavia solitamente la riserva, in questi periodi, si mantiene intorno ai massimi livelli fino al termine dell'anno e all'inizio di un nuovo anno idrologico.

data	ET0a	Kc bac	ETc	TAW	p	RAW	Dr,i start	Dr, i end	Pa	RO	AAW	Ks	ETcR	DP	ΔR
15/11/2014	1,39	1,04	1,44	129,5	0,678	88,2	19,83	19,02	2,2	0,0	110,5	1	1,44	0,0	0,81
16/11/2014	1,61	1,04	1,67	129,5	0,678	88,2	19,02	17,75	2,9	0,0	111,8	1	1,67	0,0	1,27
17/11/2014	0,53	1,04	0,55	129,5	0,678	88,2	17,75	-1,49	33,4	13,6	131,0	1	0,55	1,5	17,75
18/11/2014	1,75	1,04	1,81	129,5	0,678	88,2	0,00	-1,00	2,8	0,0	130,5	1	1,81	1,0	0,00
19/11/2014	0,78	1,08	0,85	129,5	0,678	88,2	0,00	-4,34	5,2	0,0	133,8	1	0,85	4,3	0,00
20/11/2014	0,47	1,08	0,51	129,5	0,678	88,2	0,00	0,32	0,2	0,0	129,2	1	0,51	0,0	-0,32
21/11/2014	0,53	1,08	0,57	129,5	0,678	88,2	0,32	0,83	0,1	0,0	128,7	1	0,57	0,0	-0,51

Tab. 4.8 – un periodo del bilancio 2014: ritorno del ruscellamento e della percolazione profonda

4.3.4 – Equazione finale del bilancio idrogeologico su base fenologica

Da quanto sopra illustrato emerge che, tutti i parametri che concorrono a comprendere le dinamiche idriche giornaliere nel suolo, portano alla stima dei 5 parametri che formano il bilancio idrogeologico su base fenologica a tutte le scale temporali:

<i>precipitazioni (corrette) = evapotraspirazione reale + ruscellamento + percolazione profonda + variazione della riserva idrica</i>	(equazione 4.4)
$Pa = ETcR + RO + DP + \Delta R$	

In ogni giorno, settimana, mese, anno o per periodi maggiori questa equazione di bilancio viene rispettata. Si veda il capitolo 10 per tutti i risultati annuali del bilancio e per gli andamenti mensili dei vari parametri, anche per il confronto con i deflussi di base misurati alla sezione di chiusura del bacino e con l'andamento delle falde acquifere.

La tabella 4.8 riporta tutte le relazioni tra i parametri del bilancio e con altri dati.

PARAMETRO DI INGRESSO	PARAMETRI NEL CUI FOGLIO DI CALCOLO ENTRA DIRETTAMENTE
Mappa di uso del suolo	Limiti min e max AMC, Kc bac, profondità media delle radici, parametro P, CN del bacino
Evapotraspirazione potenziale Penman Monteith (ET ₀ PM)	Viene subito corretta in ET _{0a} (mediante Ca) e non entra direttamente in alcun parametro
Precipitazioni	Vengono subito corrette in Pa (mediante Ca) e non entra direttamente in alcun parametro
Coefficiente di acclività (Ca) 1/Ca (inverso del Ca)	ET ₀ PM Precipitazioni
Evapotraspirazione potenziale Penman Monteith corretta (ET _{0a})	KcTN Viene poi corretta in ET _c (mediante Kc bac) e non entra direttamente in alcun altro parametro
Precipitazioni corrette (Pa)	KcTN, ruscellamento, bilancio fenologico giornaliero
Correzione climatica coefficienti	Kc
Coefficienti colturali delle componenti di uso del suolo (Kc)	Kc bac
Coefficiente da terreno nudo (KcTN)	Kc bac
Coefficiente unico di bacino (Kc bac)	ET _{0a}
Evapotraspirazione potenziale colturale (ET _c)	Ruscellamento, parametro P, bilancio fenologico giornaliero
Antecedent (soil) moisture conditions (AMC)	Tipologia di CN (I, II o III) e associato il valore del parametro B
Parametro B	Ruscellamento
Valore di curve number (CN) del bacino	Calcolo dei valori di CN I(s), CN II(s), CN III(s)
Valori di CN I(s), CN II(s), CN III(s) (s=corretti per la pendenza media del bacino)	Ruscellamento
Profondità media delle radici	TAW
Parametro P	Bilancio fenologico giornaliero (calcolo della RAW)
Riserva idrica dei suoli (TAW, total available water)	Bilancio fenologico giornaliero (calcolo della RAW, della ET _c R)
Riserva idrica dei suoli facilmente utilizzabile (RAW, rapidly available water)	Bilancio fenologico giornaliero (calcolo del K _s)
Coefficiente da stress idrico (K _s)	Bilancio fenologico giornaliero (calcolo della ET _c R)
Ruscellamento	Bilancio fenologico giornaliero (calcolo della ET _c R, della percolazione profonda)
BILANCIO FENOLOGICO GIORNALIERO determina le voci finali del bilancio (NB Pa e ruscellamento calcolati fuori bilancio)	Precipitazioni corrette (Pa) = Evapotraspirazione colturale reale (ET _c R) + ruscellamento + percolazione profonda + variazione della riserva idrica del suolo

Tab. 4.9 – relazioni tra dati e parametri del bilancio idrogeologico su base fenologica

4.3.4 – Significato della variazione della riserva idrica del suolo ΔR

Sicuramente nuovo è il parametro della variazione della riserva idrica del suolo, un parametro che nel quaderno FAO n°56 non è descritto ma che è indispensabile per comprendere le dinamiche idriche in una modellazione continua a livello di bacino. Per quanto riguarda il 2014 il bilancio finale ha i seguenti valori (in mm):

precipitazioni	=	ETcR	+	RO	+	DP	+	ΔR
1067		504		140		236		187

Il valore di ΔR , il cui andamento per il 2014 è riportato nel grafico di fig. 4.5, altro non è che **l'acqua fornita dalle precipitazioni per ricostituire la riserva idrica** (anch'essa riportata in fig. 4.5). Tuttavia il suo valore non è pari alla TAW (129,5 mm nel 2014), come si potrebbe pensare in un primo momento: infatti durante l'anno nella riserva viene movimentato un enorme quantitativo di acqua, con variazioni sia in positivo che in negativo. Praticamente tutta la formazione della ETcR avviene in questo movimento. Il totale del movimento, per l'anno 2014, è di 903 mm, di cui 545 in positivo e 358 in negativo. La differenza tra i due valori è proprio 187 mm: come si spiega un tale dato? Potremmo ricorrere ad un paragone: la discesa della riserva e la risalita è come una scala da percorrere, con (per il 2014) 129 scalini in discesa e 129 scalini in salita. Occorrono quindi 258 passi. Ma il percorso non è lineare: sia nella discesa che nella salita ogni tanto si fa un passo indietro, poi magari due in avanti e poi quattro indietro, poi una decina in avanti...e così via. Per fare il percorso occorrono non 258 passi ma, per l'appunto, ben 903, di cui 187 sono i passi "netti" per ritornare in cima alla scala. Tale andamento è ben illustrato in fig. 4.4 ove l'andamento della riserva è tutt'altro che lineare, e l'andamento della ΔR presenta numerosissimi alti e bassi. La riserva a volte eccede il valore massimo (max AAW), e in quel caso c'è percolazione profonda, ma questo eccesso non è inglobato nella ΔR .

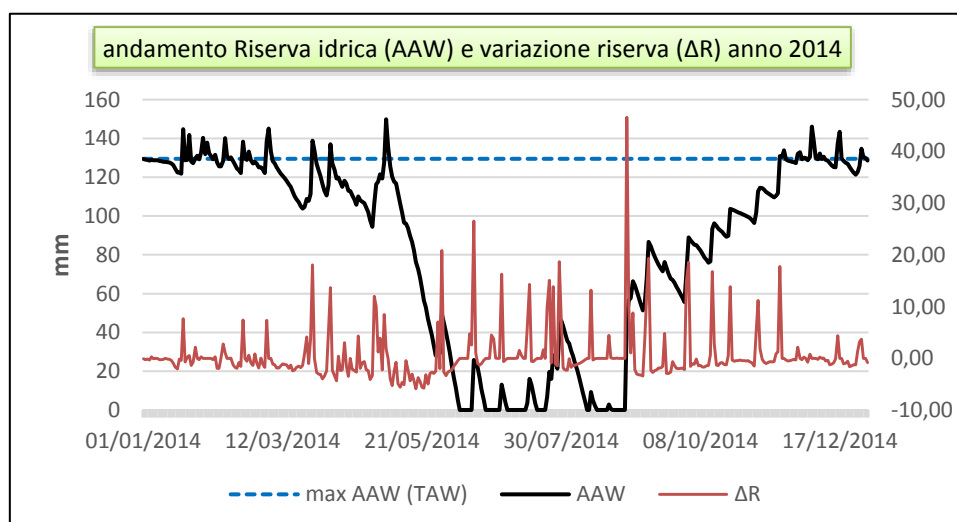


Fig. 4.5 – grafico che illustra l'andamento, per l'anno 2014, della riserva idrica del suolo e delle variazioni di riserva. È riportato anche il valore costante massimo della riserva idrica

4.3.4 – Nota sugli apporti esterni al bacino

Per quanto riguarda eventuali apporti esterni, nel bacino vi è il depuratore delle Conce che scarica sia acque chiare (di pioggia) che acque nere (reflue): le acque nere derivano dall'acquedotto e provengono dall'esterno del bacino e così andrebbero quantificate. Il procedimento viene descritto nel capitolo 9 e il valore di A_e viene direttamente tolto dai deflussi misurati cosicché, nella calibrazione del bilancio (compatibilità tra l'andamento della percolazione profonda e l'andamento delle falde acquifere e del deflusso misurato a Bivio Borzaga, cap.10) non si risente di tale apporto.

In realtà ci sono anche scarichi in forma diffusa che non passano dal depuratore e che provengono dalla rete acquedottistica e quindi dal di fuori del bacino; tuttavia tali apporti non sono stati quantificati.

Occorre sottolineare che ci potrebbero essere anche ingressi di acqua attraverso le strutture geologiche (il backthrust) ma non possono essere quantificate e forse vanno inglobate nel deflusso di base.

4.4 – CENNI SU ALTRI MODELLI CONCETTUALI DI STIMA DELL'EVAPOTASPIRAZIONE REALE: BUDYKO FRAMEWORK

4.4.1 – Budyko curve e miglioramenti successivi

A livello di studio idrologico sono largamente utilizzati modelli empirici che forniscono equazioni per la stima della ETcR annuale sulla base di numerosissime osservazioni relative al comportamento di svariati bacini nel mondo. Sono di più immediata applicazione rispetto al modello di bilancio presentato in questo lavoro, ma forniscono minori informazioni.

L'equazione di Budyko (1974) si basa sull'osservazione di svariati bacini dell'ex URSS ma è stata ampiamente utilizzata in molti bacini nel mondo. Egli trovò che l'evapotraspirazione reale, nel lungo periodo, è controllata dalla disponibilità di energia (espressa in termini di energia potenziale) e dalla disponibilità di acqua (espressa in termini di precipitazioni) (Budyko, 1958). L'equazione di Budyko è riportata in fig. 4.7 assieme ad altre che presentano simili caratteristiche di cui poi si tratterà brevemente. Tutti i bacini, in base ai 3 parametri AET, PET, P si posizionavano nell'intorno della curva descritta in fig. 4.6:

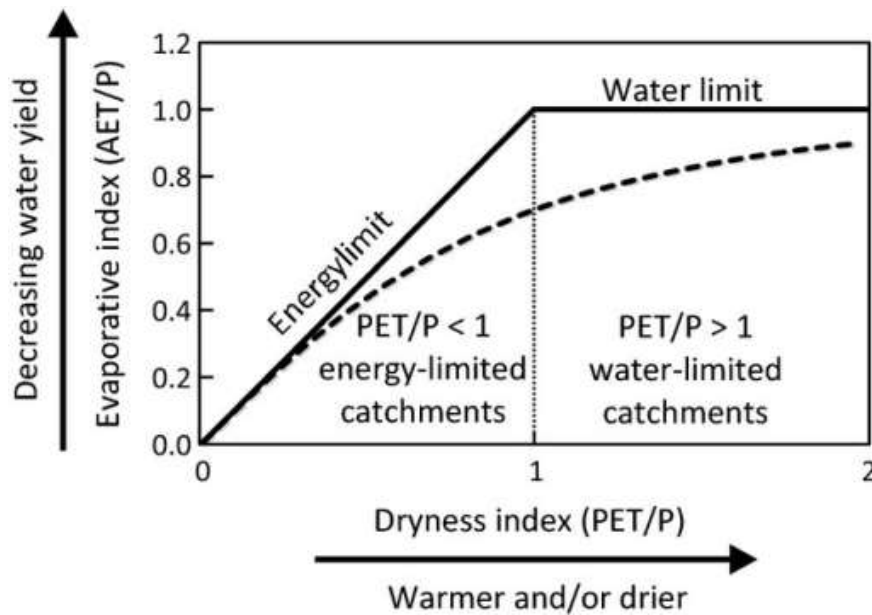


Fig. 4.6 – Curva di Budyko

Il grafico di Budyko presenta in ordinata il rapporto evapotraspirazione reale/precipitazioni (**indice evaporativo**), mentre in ascissa il rapporto evapotraspirazione potenziale/precipitazioni (**indice di aridità**). Gli acronimi in lingua inglese “AET” e “PET” stanno rispettivamente per “actual evapotranspiration” e “potential evapotranspiration” (denominati ETcR ed ET0 nel bilancio fenologico appena descritto). La curva è delimitata da due rette: la “energy limit” indica bacini in cui AET=PET ovvero tutta la domanda evapotraspirativa viene soddisfatta poiché c’è abbondante precipitazione: sono climi umidi. Al contrario la linea “water limit” indica i bacini per cui il rapporto AET=P ovvero tutta l’acqua disponibile evapotraspira, non c’è surplus: sono climi aridi. Tanto più si va verso destra tanto più i climi sono aridi (la PET aumenta molto), tanto più si va verso l’alto tanto più diminuisce il surplus di acqua fino alla retta “water limit”.

Table 1. Description of Different Relationships for Estimating Annual Evapotranspiration

Equation	Symbol	Reference
$E = P[1 - \exp(-E_0/P)]$	E , P , and E_0 are annual values of actual evapotranspiration, precipitation, and potential evapotranspiration, respectively, in mm	Schreiber [1904]
$E = P[1 + (P/E_0)^2]^{0.5}$	as above	Pike [1964]
$E = [P(1 - \exp(-E_0/P))E_0 \tanh(P/E_0)]^{0.5}$	as above	Budyko [1974]
$E = P(1 + w(E_0/P))/(1 + w(E_0/P) + P/E_0)$	as above, w is a coefficient between 0.5 and 2.0	Zhang et al. [2001]

Fig. 4.7 – differenti equazioni per la stima della AET annuale (ripreso da Zhang, 2004)

La curva di Budyko assume che i bacini siano in stato stazionario e che siano guidati dal macro-clima, due condizioni dipendenti dalla scala di applicazione: l’attendibilità del modello è più grande quando si usano medie a lungo termine ($\gg 1$ anno) e per grandi bacini (>10000 km²) (Donohue, 2006). Al ridursi della grandezza del bacino la AET può risentire di condizioni locali anche non-climatiche come la topografia e l’uso del suolo (Budyko, 1974). Di conseguenza, per scale temporali e spaziali più grandi l’uso del suolo gioca un ruolo importante (ne abbiamo avuto la riprova nel bilancio

fenologico); Zhang et al. (2001) hanno introdotto un'equazione (fig. 4.7) con un parametro w che presenta 3 valori: 0,5 per pascoli/seminativi, 2 per zone boscate, 1 per zone miste. Il parametro w indica l'acqua disponibile per le piante (ovvero la differenza relativa di come le piante usano l'acqua del suolo per la traspirazione). In tal modo l'uso del suolo entra nel Budyko framework (fig. 4.8).

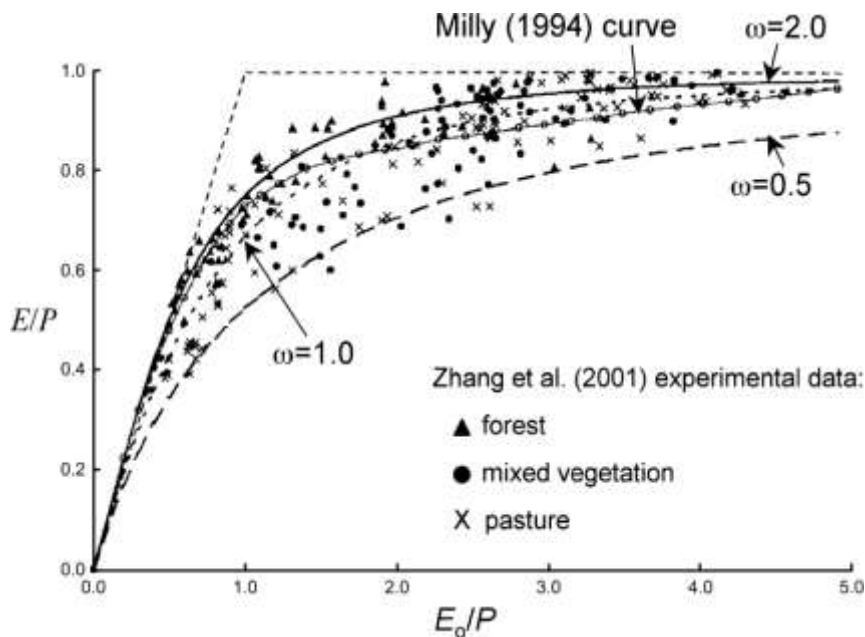


Fig. 4.8 – le curve di Zhang et al. con differenti valori del parametro w (acqua disponibile per le piante). $E=AET$, $E_0=PET$. È riportata anche la curva di Milly (1994)

All'aumentare del parametro w aumenta la potenzialità traspirativa e quindi la curva si sposta più in alto (a parità di precipitazioni c'è una maggiore AET). La differenza è minore per climi molto umidi o molto asciutti, è massima quando $PET = P$. La fig. 4.8 riporta altre curve che presentano miglioramenti a Budyko, quella di Turc-Pike è precedente. Milly (1994) aveva introdotto parametri che consideravano la riserva idrica del suolo e vari parametri stagionali, Sankarasubramanian e Vogel (2002) anch'essi la capacità di umidità del suolo.

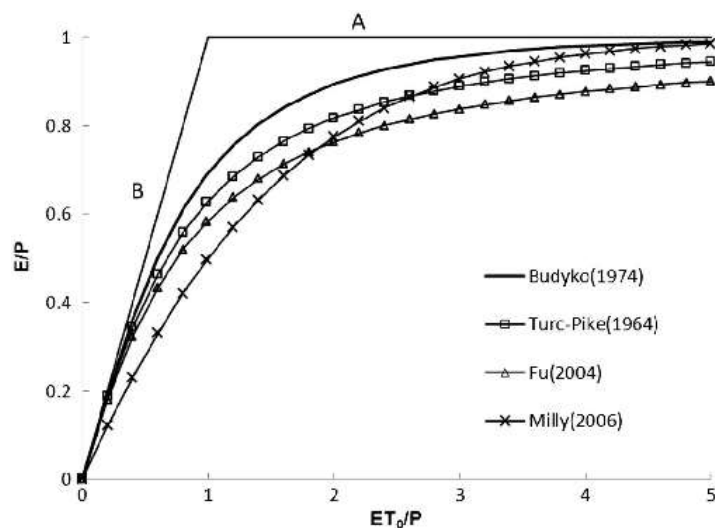


Fig. 4.9 – curva di Budyko e altre varianti

4.4.2 – Applicazione dell'equazione di Zhang (2001) agli anni di bilancio e confronto con LA ETcR calcolata con il bilancio fenologico

Abbiamo visto nella sezione 4.3.4 i risultati annuali del bilancio fenologico; di seguito sono riportati:

precipitazioni	=	ETcR	+	RO	+	DP	+	ΔR
1067		504		140		236		187

L'equazione di Zhang porta agli stessi risultati di ETcR? L'equazione è la seguente:

$ET/P = (1+wE_0/P)/(1+wE_0/P+(E_0/P)^{-1})$	(equazione 4.5)
---	-----------------

Con le seguenti corrispondenze col bilancio fenologico:

ET = ETcR

E₀ = E_{T0}

Considerando che, per il 2014, la E_{T0} Penman Monteith è di 1021, ne deriva che utilizzando un valore medio di w (=1) la ETreale ha valore di 695 mm, quindi molto maggiore. Questo forse deriva anche dall'equazione di calcolo per la E_{T0}: forse Zhang et al. Non hanno utilizzato la formula PM che, ad esempio, stima di più la E_{T0} di Thornthwaite & Mather. La formula di PM comunque è ormai universalmente riconosciuta come la più attendibile. Anche per gli altri anni di bilancio l'equazione di Zhang sovrastima: ecco il dettaglio:

anno	Valore ETcR bilancio fenologico (mm)	Valore ET Zhang (mm)
2013	475	680
2014	504	695
2015	392	633
2016	462	615

Tab. 4.10 – confronto tra l'evapotraspirazione reale calcolata con l'equazione di Zhang e l'evapotraspirazione reale calcolata con il bilancio fenologico

Ciò che quasi corrisponde, tra i due modelli, sono i rapporti reciproci tra i valori dei vari anni, con un'inversione 2015-2016.

CAPITOLO 5

STIMA E ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI E DELLA EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE (ET₀) E CORREZIONE CON IL COEFFICIENTE DI ACCLIVITA'

5.1 – IL COEFFICIENTE DI ACCLIVITA'

Nell'effettuare la stima di quanta acqua è piovuta in un bacino si considera la superficie del bacino come se fosse piana; i dati delle stazioni vengono estrapolati alle aree limitrofe (metodo delle isoiete, dei poligoni di Thiessen...) e non c'è correzione per la superficie reale del bacino. È lecito fare tale correzione? Per quali principi occorre effettuarla? Supponiamo che, al di sopra della linea di spartiacque, il bacino sia "coperto" da un tetto piano: l'acqua di precipitazione si distribuisce su tale superficie che corrisponde alla superficie proiettata del bacino: per il bacino (ridotto) SMA tale superficie è di 13,098 km². Tuttavia l'acqua non si ferma su tale superficie ipotetica, ma prosegue la discesa e si distribuisce su una superficie più ampia, pari alla superficie reale: 13,979 km² per il SMA. La fig. 5.1 schematizza tale processo. Il segmento ABC è il profilo di suolo. La superficie proiettata di BC è BD (in 2 dimensioni); si ha che AB=BD, e ovviamente BC>AB e BC>BD.

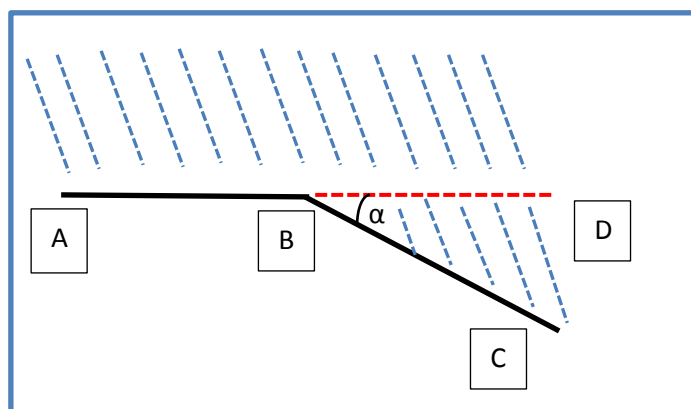


Fig. 5.1 – schematizzazione delle condizioni per l'applicazione del Ca

La quantità di acqua che cade su AB e su BD è la stessa, ma la quota che cade su BD si va a distribuire su una superficie maggiore, ovvero BC, quindi è come se "diluisse": ne deriva una diminuzione di precipitazioni se vogliamo tenere conto della superficie reale.

Il rapporto tra superficie reale e superficie proiettata è stato denominato "Coefficiente d'acclività" (Ca) e per il bacino SMA ha valore 1,067. Il suo inverso, 0,937, è il coefficiente con cui devono essere corretti i dati di precipitazione. Per l'evapotraspirazione il funzionamento è opposto: la superficie evapotraspirativa, quella reale, è allo stesso modo maggiore di quella proiettata e quindi la ET₀ va moltiplicata per il Ca e non per il suo inverso.

Riguardo all'esempio della fig. 5.1, se consideriamo lo schema come rappresentativo della condizione del bacino SMA, ne deriva che se su AB piovono 10 mm di acqua, su BD ne cadono altrettanti ma su BC se ne distribuiscono $10 \times 0,937 = 9,37$ mm. Di conseguenza sul bacino sono caduti 20 mm ma ne vanno considerati 19,37 mm. L'angolo α è ovviamente correlato al Ca: tanto è maggiore tanto maggiore è il Ca e tanto minore il suo inverso. Infatti α rappresenta la pendenza media del bacino.

Per il bacino SMA, avente pendenza media del 32,6%, tale valore = $\arctan(0,326) \approx 18,06^\circ$.

Se invece si dispone dell'angolo (ad esempio $\beta = 15^\circ$) e si vuole ottenere il Ca, si calcola così:

$$\text{pendenza in \%} = \tan(\beta) * 100 = 26,8\%$$

$$Ca = BC/BD = 1/\cos(\beta) = 1/\cos(15) = 1,035$$

Come volevasi dimostrare, a pendenza minore corrisponde minore Ca. Per il bacino SMA il Ca è stato ottenuto mediante rapporto tra superficie reale e apparente calcolate con il GIS (una TIN per la superficie reale), ma si può ottenere la pendenza media del bacino anche a partire dal raster delle pendenze (ottenibile da TIN anch'essa o da altri modelli digitali del terreno) e di conseguenza calcolare il Ca. I due valori sono circa coincidenti.

5.2 – FONTI DEI DATI PER LE PRECIPITAZIONI E PER LA EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE

Per il presente lavoro, sia al fine della determinazione delle precipitazioni che per la determinazione della ET₀ (tab. 5.2), sono stati utilizzati i dati messi gentilmente a disposizione dall'Osservatorio Meteorologico "A. Serpieri", Dipartimento di Scienze Biomolecolari, Università degli Studi di Urbino Carlo Bo, concernenti 4 stazioni meteorologiche di cui 2 appena fuori il bacino di Santa Maria degli Angeli e 2 sugli spartiacque (fig. 5.2). Si è utilizzata la stazione meteo di Urbino della Protezione Civile per reperire dati di radiazione solare, momentaneamente indisponibili alle stazioni dell'Osservatorio. Si sono poi utilizzate le stazioni meteo di Urbania e Sant'Angelo in Vado della Protezione Civile solamente per quanto concerne la stima delle precipitazioni sul bacino medio-alto Metauro nel 2016. Purtroppo ci sono poche stazioni sul bacino e tutte alle basse quote, quindi per la stima dell'altezza di pioggia ci si è avvalsi della regressione quota/precipitazioni della provincia di Pesaro Urbino, ottenuta mediante analisi dei dati di precipitazione del periodo 1960-2003 di 39 stazioni (dell'Istituto idrografico nazionale di Bologna) + la stazione di Bocca Serriola (Prot. Civ.) per aumentare i dati alle alte quote, sebbene con periodo limitato. Le stazioni sono le seguenti:

Stazioni Osservatorio Serpieri	Quota	Dati forniti (valori giornalieri od orari)	Anno
CESANE	634	Precipitazioni, temperature (min, media, max), pressione, umidità relativa (min, max), velocità del vento <i>valori giornalieri od orari</i>	2013
URBINO	476		2014
Campus "E.Mattei" (ex Sogesta)	360		2015
FERMIGNANO	235		2016
			2017
Stazioni Protezione Civile	quota	Dati forniti (valori giornalieri)	anno
URBINO	476	Radiazione solare	2013-2016
URBANIA	273	Precipitazioni	2016
SANT'ANGELO IN VADO	359		2016
BOCCA SERRIOLA	730		2001-2013 (per regressione)

Stazioni Istituto Idrografico Nazionale di Bologna: precipitazioni (*valori mensili*)

Stazione	Quota	Stazione	Quota	Stazione	quota
PESARO	11	PERGOLA	265	CASTELLO DI NARO	417
FANO	12	BARGNI	273	TAVOLETO	426
FIENILE DI FANO	20	URBANIA	273	MERCATELLO	429
CALCINELLI	64	NOVAFELTRIA	275	SAN SAVINO	430
MONTELABBATE	65	CAGLI	276	URBINO	451
MONTE PORZIO	105	BARCHI	319	CELLA	455
FOSSOMBRONE	116	MACERATA FELTRIA	321	PENNABILLI	629
MONDOLFO	144	PETRIANO	327	FORESTA DELLA CESANA	640
TAVULLIA	170	PIOBBICO	339	FORTE AVELLANA	685

PIAGGE	201	SANT'ANGELO IN VADO	359	BOCCA SERRIOLA (1991-2013)	730
ACQUALAGNA	204	CANTIANO	360	CARPEGNA	748
SAN LORENZO IN CAMPO	209	PIEVE DI CAGNA	410	MIRATOIO	831
CANDELARA	210	FRONTONE	412	BOCCA TRABARIA	1049

Tab. 5.1 – stazioni meteo i cui dati sono stati utilizzati per lo studio

La seguente figura riporta l'ubicazione delle quattro stazioni dell'Osservatorio. Avendo il bacino una quota media di 336 m. s.l.m. si sono utilizzati come dati, ai fini del bilancio, le **medie delle tre stazioni alle più basse quote** (quota media delle tre = 357 m), quindi escludendo le Cesane. Un altro metodo, forse più preciso, sarebbe stato quello di calcolare una regressione quota-precipitazioni per ogni evento di pioggia e inserire in tale equazione la quota media del bacino: sarebbe tuttavia stato troppo dispendioso. La stazione di Fermignano, pur essendo fuori bacino, ha fornito dati a più bassa quota e si è rivelata necessaria.

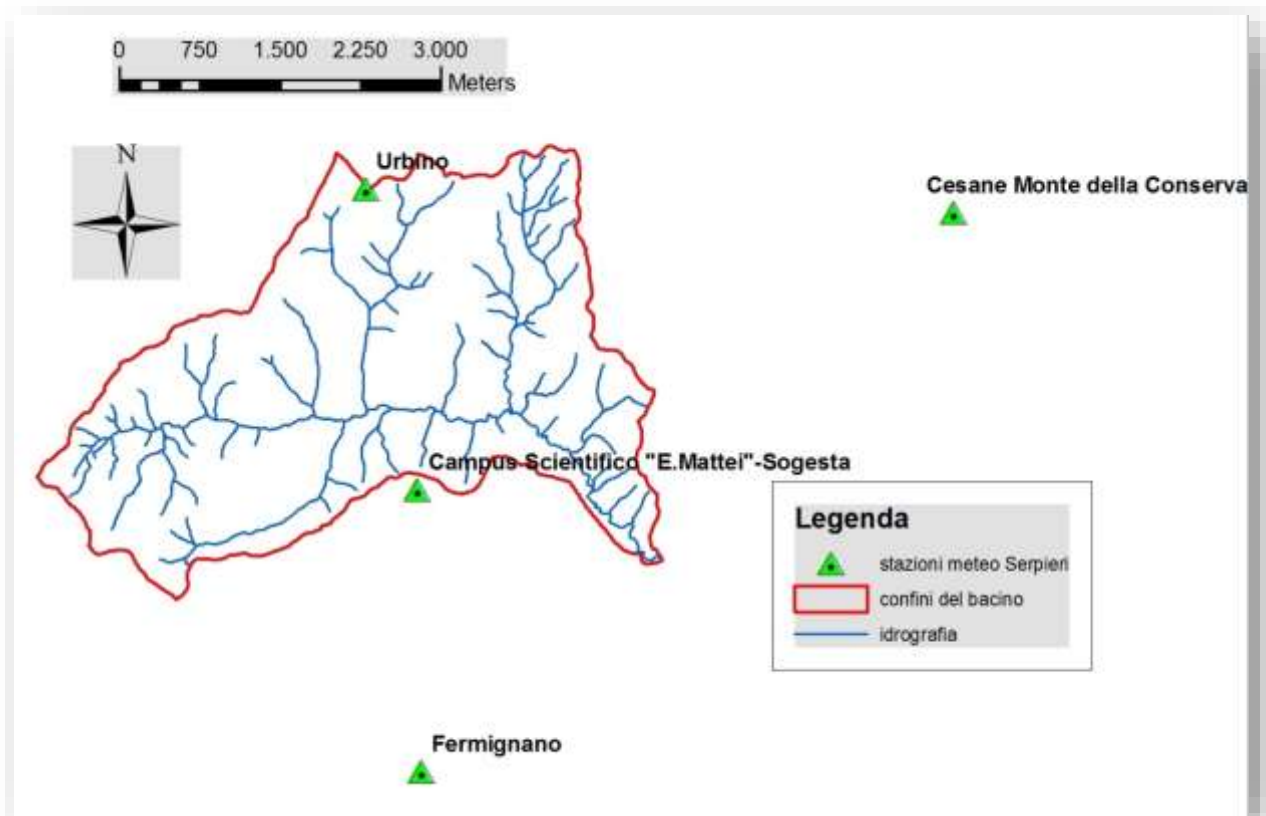


Fig. 5.2 – ubicazione delle 4 stazioni meteo dell'Osservatorio "A. Serpieri" - Urbino

5.3 – STIMA DELLA EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE CON IL METODO PENMAN MONTEITH

L'evapotraspirazione (ET) è la quantità di acqua persa da un sistema suolo-piante per effetto di (fig. 5.3):

- evaporazione dal suolo e (in misura minore) dalle superfici di foglie, tronchi ecc.;
- traspirazione delle piante

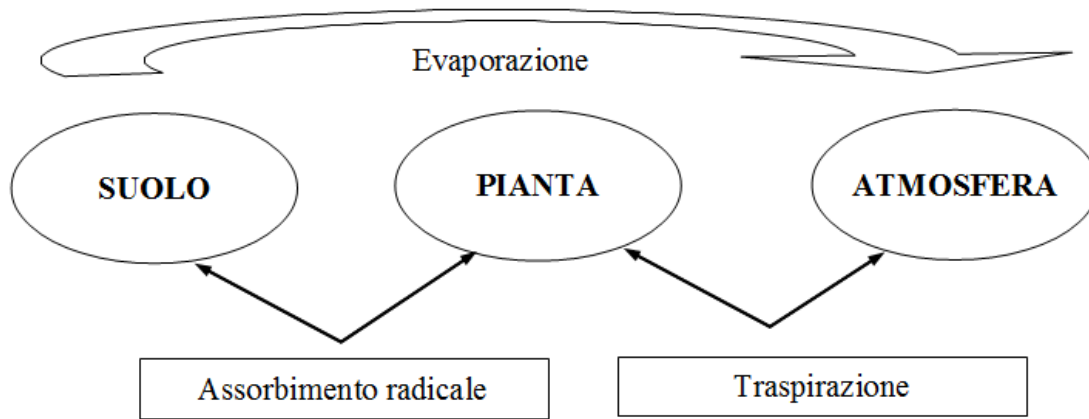


Fig. 5.3 – il sistema suolo-pianta-atmosfera e i processi di evaporazione-traspirazione

La formula di Penman Monteith (eq. 5.1) per la stima dell'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) è stata adottata dopo decenni di misure e validazioni di innumerevoli equazioni, che hanno denotato una performance variabile a seconda di come si adattavano alle condizioni locali (metodo Penman modificato, metodo radiazione, metodi che si basano sulla temperatura ad eccezione di Hargreaves 1985 che sembra avere buoni risultati globali, metodi pan...). La formula di Penman (1948), modificata da Monteith (1965) è raccomandata dalla FAO come il solo metodo standard; è un metodo che ha una forte probabilità di predire correttamente la ET_0 in un ampio range di località e di climi ed è possibile la sua applicazione anche con dati limitati (Allen et al., 1998).

L'equazione di Penman Monteith (PM da qua in avanti) prevede due fattori di resistenza al flusso evapotraspirativo (fig.5.4): la "surface resistance", r_s , descrive la resistenza che incontra il flusso di vapore per passare attraverso gli stomi, l'area della foglia e la superficie del suolo; la "aerodynamic resistance", r_a , descrive la resistenza che avviene al di sopra della vegetazione e comprende l'attrito che l'aria subisce quando passa sopra le superfici vegetali.

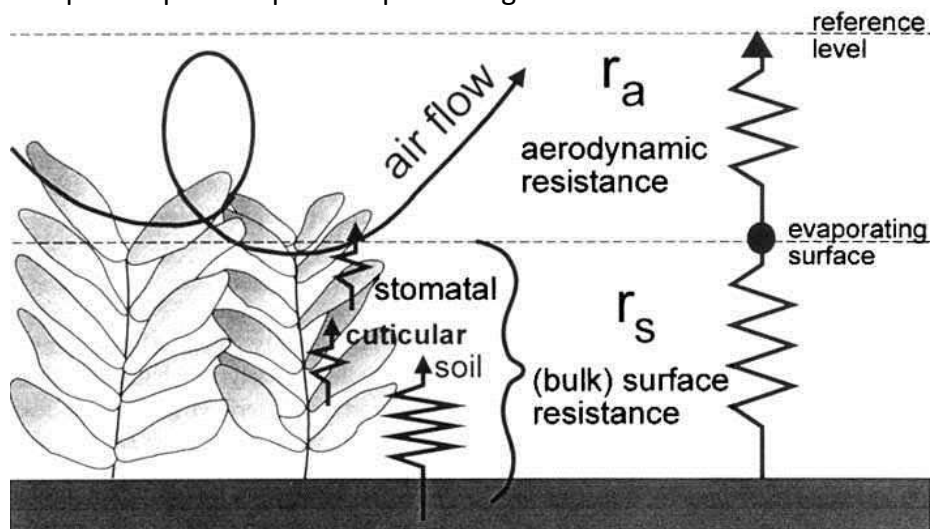


Fig. 5.4 – le resistenze che incontra il flusso di vapore, parametri dell'equazione di Penman Monteith (da quaderno FAO n°56)

L'equazione di PM riportata in equazione 5.1 è un'ulteriore evoluzione adottata dalla FAO: infatti i termini r_s e r_a non ci sono in quanto la ET_0 è definita essere l'evapotraspirazione di riferimento propria di un prato di erba tagliata a 12 cm di altezza, avente r_s di $0,70 \text{ s m}^{-1}$ e un albedo (ovvero la

porzione di luce riflessa dalle superfici delle foglie) di 0,23 (Smith et al., 1992, Zotarelli et al., 2010). La coltura di riferimento è mantenuta in condizioni idriche ottimali (non c'è stress idrico).

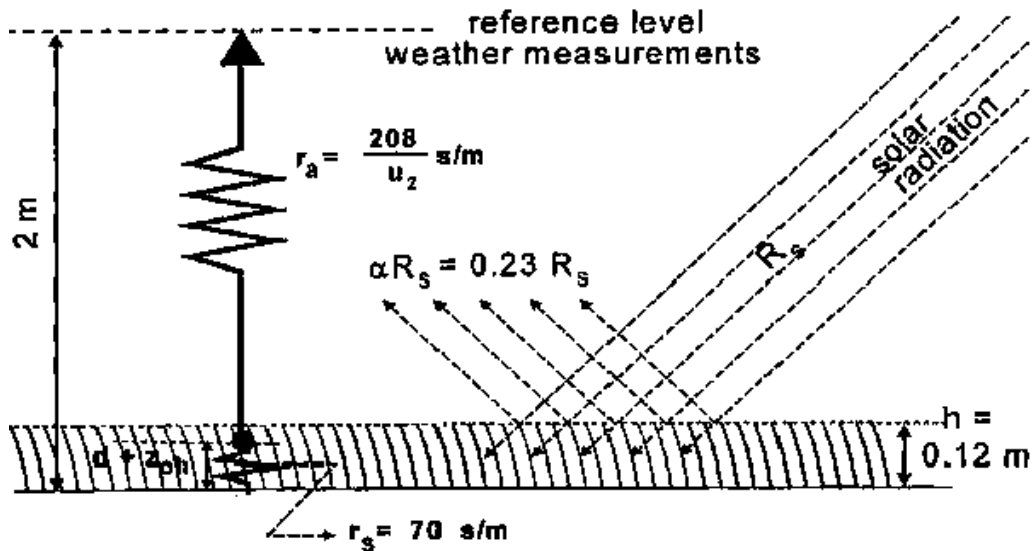


Fig. 5.5 – caratteristiche della ipotetica coltura di riferimento (erba, erba medica, festuca) (da quaderno FAO n°56)

L'evapotraspirazione calcolata con l'equazione 5.1 fornisce uno standard per cui:

- l'evapotraspirazione in diversi periodi dell'anno o in altre regioni può essere comparata;
- l'evapotraspirazione di altre coltivazioni può essere messa in relazione (Zotarelli et al., 2010).

Infatti ET_0 è il valore di riferimento da cui le varie differenti coltivazioni (grano, girasole e quant'altro) si discostano in funzione delle loro fasi fenologiche: fase iniziale, di sviluppo, di maturità, di senescenza. I coefficienti colturali (K_c , cap. 6) hanno proprio lo scopo di correggere la ET_0 PM per ottenere la ET_c propria delle coltivazioni nei vari momenti dell'anno. In questo studio inoltre si sono trovati K_c per superfici non coltivate o per superfici nude (cap. 6).

$ET_0 = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)}$	(equazione 5.1)
---	-----------------

Equazione di Penman Monteith della FAO, ove:

- ET_0 = tasso dell'evapotraspirazione di riferimento [mm/giorno]
- Δ = pendenza della curva di pressione del vapore saturo [kPa/°C]
- R_n = flusso di radiazione netta [MJ/m² al giorno]
- G = flusso di calore sensibile dal suolo [MJ/m² al giorno]
- γ = costante psicrometrica [kPa/°C]
- T = temperatura media dell'aria [°C]
- U_2 = velocità del vento a 2 m sopra il suolo [m/s]
- e_s = pressione di saturazione del vapore [kPa]
- e_a = pressione di saturazione reale [kPa]
- con $e_s - e_a$ = deficit di saturazione della pressione di vapore [kPa]

I dati base di input, forniti in gran parte dall'Osservatorio "Serpieri", sono i seguenti:

Symbol	Parameter	Unit
T_{max}^a	a maximum temperature	
T_{min}^a	a minimum temperature	
RH_{max}^a	maximum relative humidity	%
RH_{min}^a	minimum relative humidity	%
R_s	average solar radiation	$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
U_2	average wind speed	$m\ s^{-1}\ at\ h^b\ m$
P	atmospheric pressure (barometric)	kPa
Z	site elevation above sea level	m
J	Julian day	-
LAT	Latitude	degree

^a values obtained in the period of 24h (0:00:01 AM to 11:59:59 PM).
^b h = height of measurement above ground surface in meters.

Tab. 5.2 – dati di input per il calcolo della ET0 PM (da Zotarelli et al., 2010)

L'equazione può essere divisa in due termini: il "radiation term" e il "wind term": la somma delle due fornisce il valore finale.

Per il calcolo dei parametri si è seguita la procedura step by step di Zotarelli et al., 2010. I dati base di input devono avere varie elaborazioni per ottenere i termini in ingresso dell'equazione. La preparazione del foglio di calcolo è piuttosto laboriosa (ci sono 21 parametri da calcolare per giungere ai due termini, "radiation" e "wind", che andranno sommati); allorché il foglio di calcolo è pronto, tuttavia, basta inserire i dati base di input e il calcolo giornaliero della ET0 anche di svariati anni si riesce a fare molto brevemente.

Una volta calcolata la ET0 questa verrà soggetta a tre correzioni:

- 1) correzione con il coefficiente di acclività (Ca), per tenere in considerazione che la superficie evapotraspirante non è piatta ma variamente acclive: $ET0a = ET0 * Ca$
- 2) correzione con il coefficiente colturale unico di bacino (cap. 6), per tenere in considerazione l'effettivo uso del suolo nelle sue fasi fenologiche: $ETc = ET0a * Kc\ bac = ET0 * Ca * Kc\ bac$
- 3) correzione con il coefficiente da stress idrico (Ks) per tenere in considerazione le condizioni di stress idrico che si incontrano durante l'anno: $ETcR = ETc * Ks = ET0 * Ca * Kc\ bac * Ks$ (equazione riportata nella equazione 6.1 del cap.6)

Si giunge infine alla determinazione della evapotraspirazione reale. Abbiamo visto negli esempi del cap. 4.2.3 come il Ks viene calcolato e quando inizia la fase di stress idrico.

5.4 – UTILIZZO DELLA REGRESSIONE QUOTA-PRECIPITAZIONI E DELLE FASCE ALTIMETRICHE PER LA STIMA DELLE PRECIPITAZIONI MENSILI NEL BACINO DEL MEDIO-ALTO METAURO

Come accennato in precedenza le stazioni nel bacino del medio-alto Metauro sono poche e a bassa quota. Si è reso necessario calcolare le precipitazioni 2016 al fine di una comparazione con il bacino SMA nell'ambito dell'analisi delle portate nei due corsi d'acqua (cap. 9). Per ovviare a questo inconveniente si sono prese le stazioni della provincia di PU i cui dati sono stati rilevati dal 1960 al 2003 dall'Istituto Idrografico di Bologna (tab. 5.1); con tali dati si sono ottenute rette di regressione quota/precipitazione per i 12 mesi dell'anno, e per ogni mese si è calcolato di quanto varia la

precipitazione al variare di 1 metro di quota (tab. 5.3). Si è ipotizzata una stazione unica che ha la quota media e i valori precipitativi medi delle stazioni di Cesane, Sogesta, Fermignano, Urbania, Sant'Angelo in Vado (la stazione Urbino è stata esclusa poiché ai margini del bacino e per non avere troppe stazioni tutte ravvicinate mentre è stata inclusa Cesane per fornire un valore alle medio-alte quote, seppure presenti una localizzazione che non è rappresentativa dei valori che si incontrano salendo verso la Bocca Trabaria). Da tali valori di precipitazione, considerando la quota media di tale stazione (372 m) e le superfici pesate (=superficie fascia/superficie bacino) delle aree delle varie fasce altimetriche, si è calcolato quanto è piovuto in quel mese per ogni fascia e la somma di valori pesati ha fornito il valore di precipitazione sul bacino (tab. 5.4). Tale metodo è applicabile solo per le cumulate mensili poiché le regressioni sono state ricavate da cumulate storiche mensili. Se si vuole applicare tale metodo a scala temporale maggiore occorre utilizzare dati giornalieri od orari per ora non disponibili, ma è probabile che a quelle scale temporali la correlazione con la quota sia minore poiché, essendo il bacino molto esteso in lunghezza, precipitazioni giornaliere o sub-giornaliere non coprono tutto il bacino.

mese	(P=precipitazioni, q = quota)	R ²	mm x metro
gennaio	$P=0,044q+51,259$	0,531	0,044
febbraio	$P=0,040q+54,046$	0,387	0,040
marzo	$P=0,040q+63,537$	0,412	0,040
aprile	$P=0,042q+68,645$	0,508	0,042
maggio	$P=0,031q+59,327$	0,439	0,031
giugno	$P=0,019q+62,096$	0,344	0,019
luglio	$P=0,007q+50,129$	0,119	0,007
agosto	$P=-0,001q+72,543$	0,001	-0,001
settembre	$P=0,025q+80,79$	0,48	0,025
ottobre	$P=0,037q+82,352$	0,45	0,037
novembre	$P=0,056q+95,349$	0,464	0,056
dicembre	$P=0,054q+79,229$	0,43	0,054

Tab. 5.3 – equazioni di regressione quota/precipitazione basati su dati 1960-2003 delle stazioni dell'Istituto Idrografico riportate in tab. 5.1

Dai valori di tab. 5.3 si nota che gli aumenti maggiori delle precipitazioni con la quota si hanno nei mesi di novembre, dicembre, gennaio, mentre c'è meno differenza di precipitazione con la quota nei mesi estivi fino a praticamente azzerarsi in agosto; in effetti nei mesi estivi i temporali hanno intensità elevata ma dimensione spaziale limitata e non coprono l'intero bacino, mentre le grandi perturbazioni invernali presentano una maggiore copertura del bacino e la quota assume maggiore importanza. Di conseguenza, riprendendo quanto scritto in precedenza, la correlazione con la quota diminuisce nei mesi estivi e probabilmente anche con piogge di breve durata (ma questo andrebbe indagato).

Calcolo pioggia mensile sul bacino del medio-alto Metauro con le fasce altimetriche Valore di precipitazione della stazione unica (quota 372,2 m) : 30,8 mm - mese di dicembre						
fasce (m)	punto medio	differenza quota	mm di partenza	mm fascia	peso fascia	pioggia pesata
100-150	125	-247,2	30,8	17	0,007558874	0
150-200	175	-197,2	30,8	20	0,023729929	0
200-250	225	-147,2	30,8	23	0,052434546	1

250-300	275	-97,2	30,8	26	0,085630976	2
300-350	325	-47,2	30,8	28	0,112358984	3
350-400	375	2,8	30,8	31	0,118646991	4
400-450	425	52,8	30,8	34	0,098501491	3
450-500	475	102,8	30,8	36	0,083832129	3
500-550	525	152,8	30,8	39	0,075214641	3
550-600	575	202,8	30,8	42	0,062808431	3
600-650	625	252,8	30,8	44	0,050893056	2
650-700	675	302,8	30,8	47	0,044390143	2
700-750	725	352,8	30,8	50	0,0432652	2
750-800	775	402,8	30,8	53	0,038924618	2
800-850	825	452,8	30,8	55	0,032931113	2
850-900	875	502,8	30,8	58	0,024361383	1
900-950	925	552,8	30,8	61	0,016446984	1
950-1000	975	602,8	30,8	63	0,012212529	1
1000-1050	1025	652,8	30,8	66	0,007041506	0
1050-1100	1075	702,8	30,8	69	0,004369767	0
1100-1150	1125	752,8	30,8	71	0,00267174	0
1150-1200	1175	802,8	30,8	74	0,001201885	0
1200-1250	1225	852,8	30,8	77	0,000382056	0
1250-1300	1275	902,8	30,8	80	0,000106127	0
1300-1350	1325	952,8	30,8	82	6,3676E-05	0
1350-1400	1375	1002,8	30,8	85	2,12253E-05	0
						37,4

Tab. 5.4 – foglio di calcolo per la determinazione della pioggia mensile caduta sul bacino medio-alto Metauro con l'utilizzo delle regressioni quota/precipitazioni e delle fasce altimetriche, per una pioggia mensile di 30,8 mm (media dei valori delle 5 stazioni indicate in precedenza) nel mese di dicembre. Differenza quota = rispetto alla quota media delle stazioni i cui dati si sono utilizzati (372 m. s.l.m.)

La fig. 5.10 riporta le fasce altimetriche del bacino medio-alto Metauro. Si rimanda anche al grafico di fig. 2.21

È stata realizzata anche un'analisi di regressione quota/temperatura i cui risultati si riportano in tab. 5.5. Come era prevedibile la temperatura diminuisce con la quota, con valori circa costanti nei vari mesi tranne in novembre e dicembre in cui ci sono valori inferiori come valore assoluto. Occorre dire che in inverno i fondovalle sono soggetti a forti gelate e questo contribuisce ad abbassare la temperatura anche a bassa quota; in alta quota, ovviamente, è presente in maniera superiore la neve.

equazioni	(P=precipitazioni, q = quota)	R ²	°C x metro
gennaio	$T=-0,0025q+5,1476$	0,76	-0,0025
febbraio	$T=-0,0024q+5,8555$	0,243	-0,0024
marzo	$T=-0,0026q+8,6541$	0,226	-0,0026
aprile	$T=-0,0024q+11,8128$	0,214	-0,0024
maggio	$T=-0,0026q+16,4631$	0,222	-0,0026
giugno	$T=-0,0026q+20,2220$	0,204	-0,0026
luglio	$T=-0,0023q+22,8093$	0,193	-0,0023
agosto	$T=-0,0023q+22,9022$	0,206	-0,0023
settembre	$T=-0,0025q+19,0687$	0,216	-0,0025
ottobre	$T=-0,0025q+14,6929$	0,229	-0,0025
novembre	$T=-0,0018q+9,5284$	0,206	-0,0018
dicembre	$T=-0,0016q+5,8799$	0,212	-0,0016

Tab. 5.5 – equazioni di regressione quota/temperatura basati su dati 1960-2003 delle stazioni dell'Istituto Idrografico riportate in tab. 5.1

5.5 – VALORI E ANDAMENTO DELLE PRECIPITAZIONI E DELLA EVAPOTRASPIRAZIONE DI RIFERIMENTO NEL BACINO SMa NEGLI ANNI DI BILANCIO – CONFRONTO CON LE MEDIE 1960-2003 DI URBINO

I grafici di fig. 5.6 e 5.7 riportano l'andamento dei valori mensili delle precipitazioni e di ET0 per il bacino SMa nei 4 anni di bilancio. Sono la media dei valori delle stazioni di Urbino, Sogesta, Fermignano. Sono valori ET0a e Pa ovvero corretti secondo il coefficiente di acclività poiché in tal modo si rappresentano i valori veri del bacino. I totali annuali sono riportati in tab. 5.6. Le precipitazioni hanno avuto un massimo nel 2014, poi vedremo nel capitolo dei risultati il significato a livello di bilancio idrogeologico fenologico di tali dati. Gli ultimi due anni si è avuto un calo. Le piogge seguono la consueta distribuzione con i picchi massimi nei mesi primaverili o autunnali, in taluni anni (2013 e 2014) nei mesi autunnali, in taluni (2015 e 2016) nei mesi primaverili. I grafici di fig. 5.8 e 5.9 riportano le medie mensili e l'andamento storico di precipitazioni, ET0 (corretti con Ca) e temperature per la sola stazione di Urbino, periodo 1960-2003 (dati originali dell'Istituto idrografico, poi corretti con il Ca). Purtroppo non ci sono dati degli ultimi 13 anni, occorre aggiungere i dati della stazione dell'Osservatorio. Le medie mensili storiche denotano una maggiore piovosità nei mesi di ottobre e novembre, dati confermati solo per quanto riguarda il novembre 2013. Il trend delle precipitazioni, dopo un calo negli anni '70 e '80, appare in lieve risalita a partire da metà anni '90.

Per quanto riguarda la ET0 abbiamo appena visto quanti parametri concorrono alla sua determinazione. La ET0 (e la ET0a di conseguenza) aumenta nei mesi estivi in quanto aumentano le temperature e diminuisce la umidità relativa; è comunque molto importante la velocità del vento (la seconda parte dell'equazione infatti è la "wind term"). Negli anni di bilancio tale trend è confermato, così come nella media storica. Interessante è la sostanziale concordanza tra trend di temperatura e trend della ET0a nella media storica 1960-2003 a dimostrare che la T gioca un ruolo importante, nonostante i numerosi parametri. Entrambi i trend appaiono in risalita di un'entità maggiore rispetto alle Pa. Occorre dire che non ci sono indicazioni se la ET0 calcolata dall'Istituto idrografico con la formula di Penman Monteith sia esattamente la stessa che si è utilizzata per questo lavoro poiché ci possono essere delle varianti: i dati sono comunque sicuramente confrontabili. Infine i valori annuali: le Pa negli anni di bilancio sono sempre state superiori alla media 1960-2003 mentre la ET0a è in linea (ricordiamo che per il bacino il dato è la media di 3 stazioni).

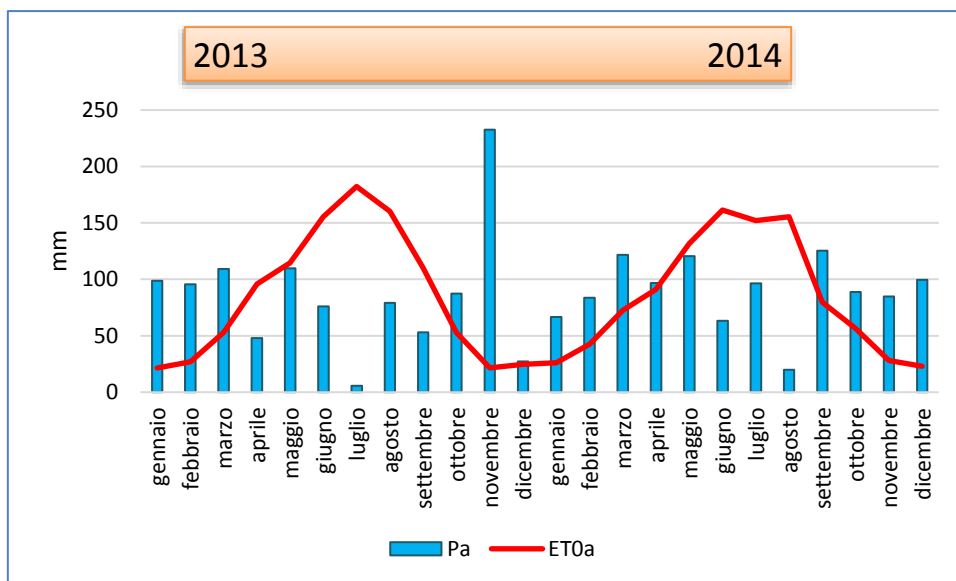


Fig. 5.6 – andamento delle precipitazioni e della ET0 (corrette con il Ca) per il 2013 e 2014

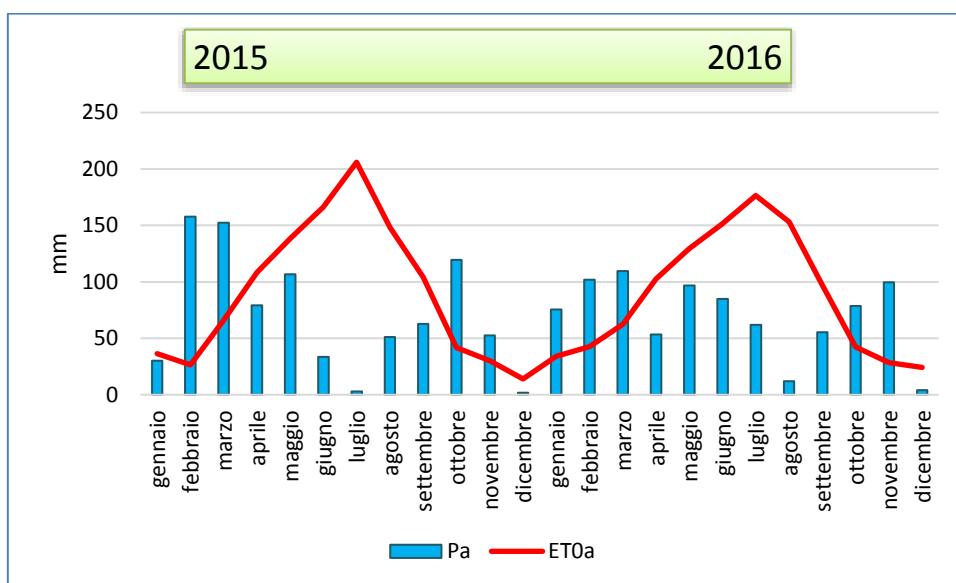


Fig. 5.7 – andamento delle precipitazioni e della ET0 (corrette con il Ca) per il 2015 e 2016

Anno idrologico	Pa (mm)	ET0a (mm)
2013	1022	1019
2014	1067	1021
2015	851	1086
2016	834	1084
Media 1960-2003 Urbino	799	1071

Tab. 5.6 – cumulate annuali di precipitazioni ed ET0 (corrette con il Ca), per gli anni di bilancio 2013-14-15-16 nel bacino SMA. Sono riportate anche le medie 1960-2003 per la sola stazione di Urbino

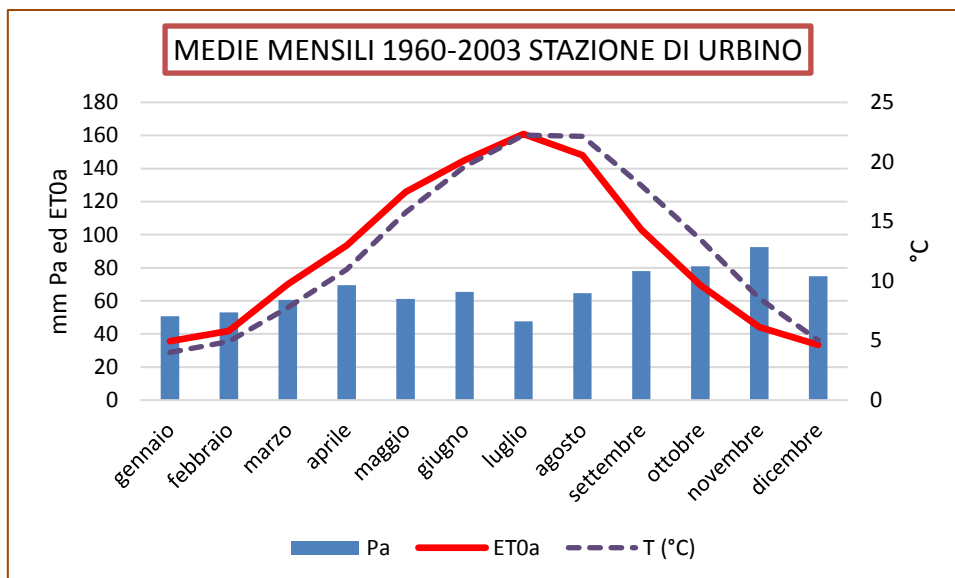


Fig. 5.8 – medie mensili di precipitazioni corrette (Pa), evapotraspirazione di riferimento corretta (ET0a) e temperature per la stazione meteo di Urbino (dati originali Istituto Idrografico, poi corretti per Ca, tranne la temperatura)

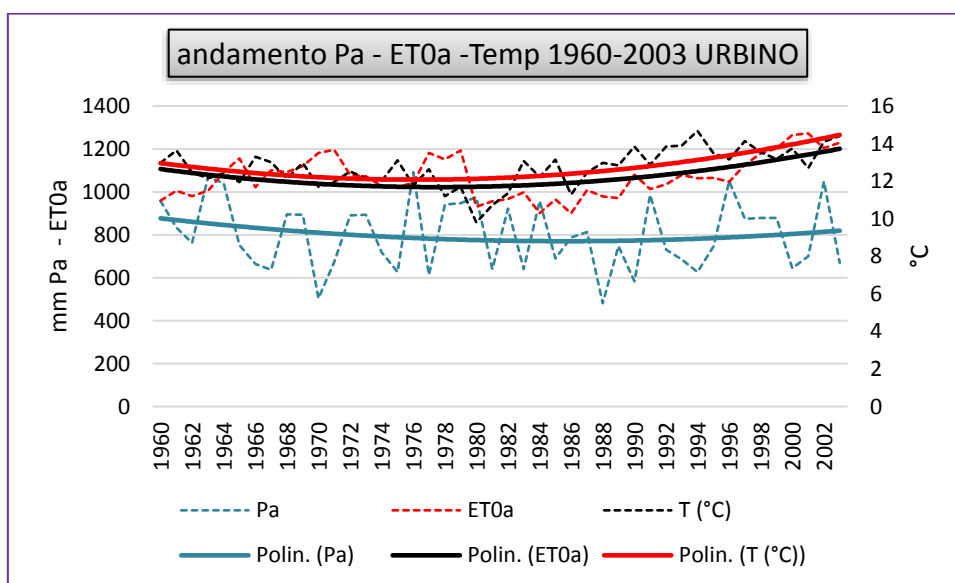
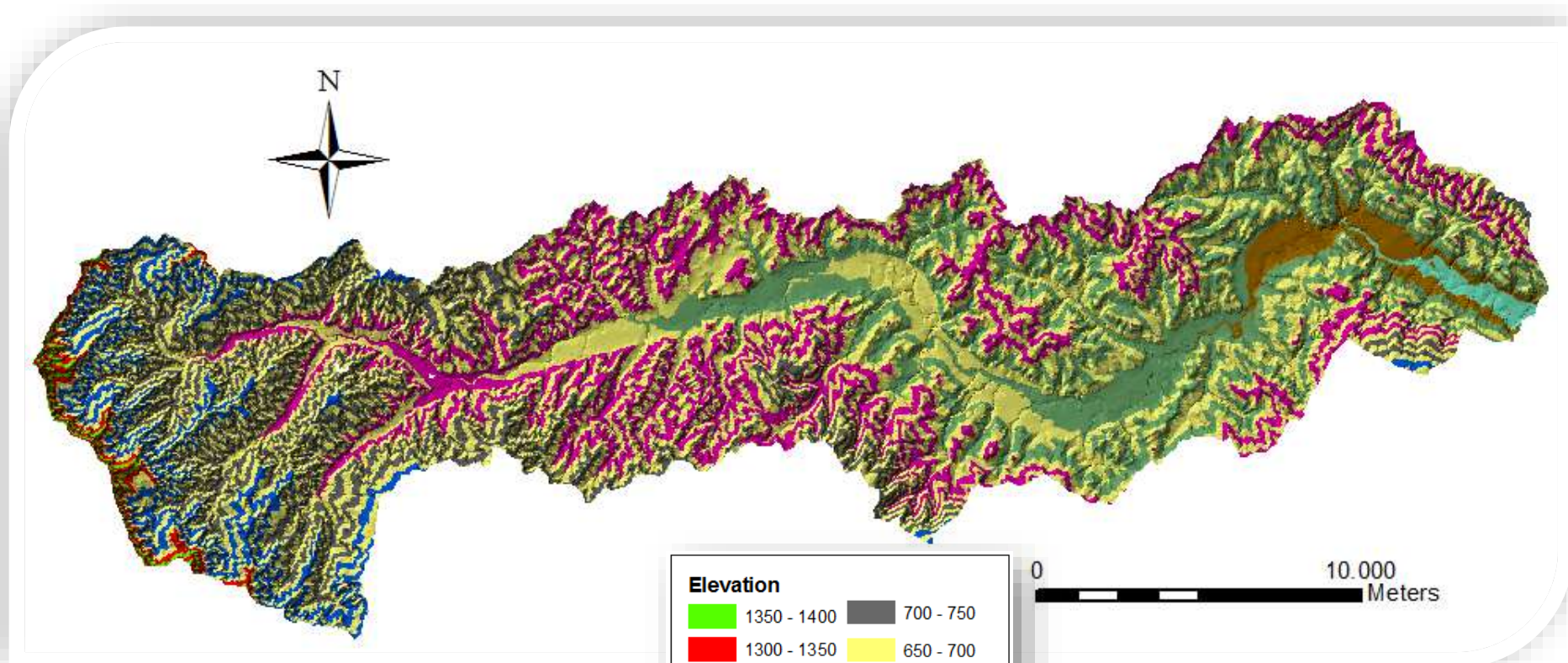


Fig. 5.9 – andamento di precipitazioni corrette (Pa), evapotraspirazione di riferimento corretta (ET0a) e temperature per la stazione meteo di Urbino (dati originali Istituto Idrografico, poi corretti per Ca, tranne la temperatura). Sono riportati i dati annuali e gli andamenti in regressione polinomiale



*Fig. 5.10 – mappa delle fasce altimetriche del bacino del medio-alto Metauro
 La mappa è realizzata con le TIN ma per le elaborazioni si sono ottenuti i raster elevation dalle TIN, indi riclassificate e trasformate in shapefiles*

Elevation	
1350 - 1400	700 - 750
1300 - 1350	650 - 700
1250 - 1300	600 - 650
1200 - 1250	550 - 600
1150 - 1200	500 - 550
1100 - 1150	450 - 500
1050 - 1100	400 - 450
1000 - 1050	350 - 400
950 - 1000	300 - 350
900 - 950	250 - 300
850 - 900	200 - 250
800 - 850	150 - 200
750 - 800	100 - 150

CAPITOLO 6 – L'EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE COLTURALE (ETc) NEL BACINO

6.1 – IL QUADERNO FAO n°56 E PRINCIPI DELLA EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE

Il quaderno FAO n°56 (Allen et al., 1998), liberamente consultabile in internet, è il testo di riferimento fondamentale di questo lavoro poiché nel modello di bilancio fenologico la parte più innovativa è l'applicazione a livello di bacino dei coefficienti e della metodologia illustrati nel quaderno FAO utilizzati per il calcolo della evapotraspirazione massima colturale delle coltivazioni. Nel presente studio, in particolare, si è cercato di descrivere la richiesta evapotraspirativa del bacino per mezzo di un unico coefficiente Kc bac che mediasse i Kc delle varie classi di uso del suolo nei diversi periodi dell'anno. Per i calcoli si veda la sezione 6.6.

I coefficienti colturali (Kc) servono per correggere la ET0 in modo da ottenere la evapotraspirazione potenziale massima (ovvero la massima richiesta d'acqua) per ogni tipo di coltura e per ogni fase fenologica della coltura stessa, in modo da poter dosare l'acqua di irrigazione. Si comprende come, soprattutto in ambienti aridi, tale metodo deve poter consentire di stimare l'evapotraspirazione con estrema precisione in modo da non sprecare acqua. La evapotraspirazione massima colturale (ETc) che si ottiene rappresenta appunto l'acqua che la pianta evapotraspirerebbe se vi fosse condizione idrica ottimale, che è l'obiettivo di chi fornisce acqua di irrigazione, e quindi la ETc corrisponde alla ETcR (evapotraspirazione colturale reale) se viene fornita acqua nella giusta misura. In assenza di irrigazione, come accade nel bacino SMA non solo nelle aree non seminative ma anche nelle aree seminative, l'acqua non è mai fornita in condizione ottimale e allora in alcuni mesi subentra lo stress idrico.

I coefficienti andrebbero calibrati sulle realtà territoriali e climatiche locali; ancora pochi studi sono presenti a riguardo in letteratura e per questo lavoro si sono utilizzati i Kc FAO ma, come sarà spiegato nella sez. 6.2.4, è comunque prevista una correzione per le condizioni climatiche delle fasi fenologiche.

Come visto nel capitolo 4.3.3 (esempi di applicazione del bilancio fenologico) e nel capitolo 5.1 la ET0 calcolata con Penman Monteith subisce le seguenti correzioni:

$ETcR = ETc * Ks = ET0 * Ca * Kc \text{ bac} * Ks$	(equazione 6.1)
--	-----------------

Ove:

ETcR = evapotraspirazione reale (è una delle incognite del bilancio fenologico, l'altra è la percolazione profonda)

ET0 = evapotraspirazione di riferimento calcolata con il metodo Penman Monteith (prato di erba o festuca alta 12 cm in condizioni idriche ottimali, cap. 5.3)

E i coefficienti sono:

Tipologia coefficiente	Utilizzo
Ca (coefficiente di acclività)	Valutare l'effetto della superficie reale
Kc bac (coefficiente colturale unico di bacino)	Valutare l'effetto dell'uso del suolo nelle sue fasi fenologiche
Ks (coefficiente da stress idrico)	Valutare l'effetto di carenza idrica nel suolo

Tab. 6.1 – i 3 tipi di coefficienti con cui si corregge la ET0 per giungere alla ETcR

Le fig. 6.1 e 6.2 illustrano tre tipologie di evapotraspirazione e i due dei tre coefficienti di tab. 6.1. Manca la ET_{0a} ($=ET_0 \cdot Ca$) che è stata introdotta in questo lavoro. ET_c adj corrisponde a $ET_c R$ e K_c adj a K_s (se non si considerano pratiche di gestione).

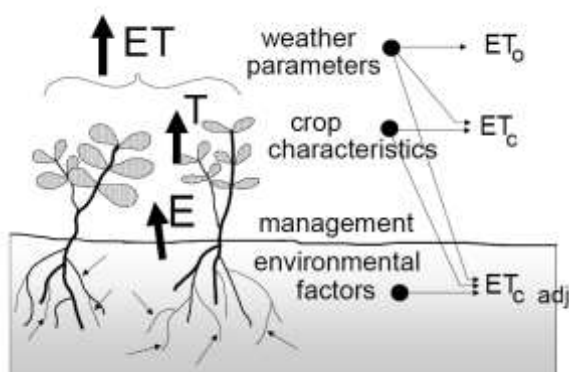


Fig. 6.1 – tre dei quattro tipi di evapotraspirazione (manca la ET_{0a} introdotta in questo lavoro che sta tra ET_0 e ET_c)

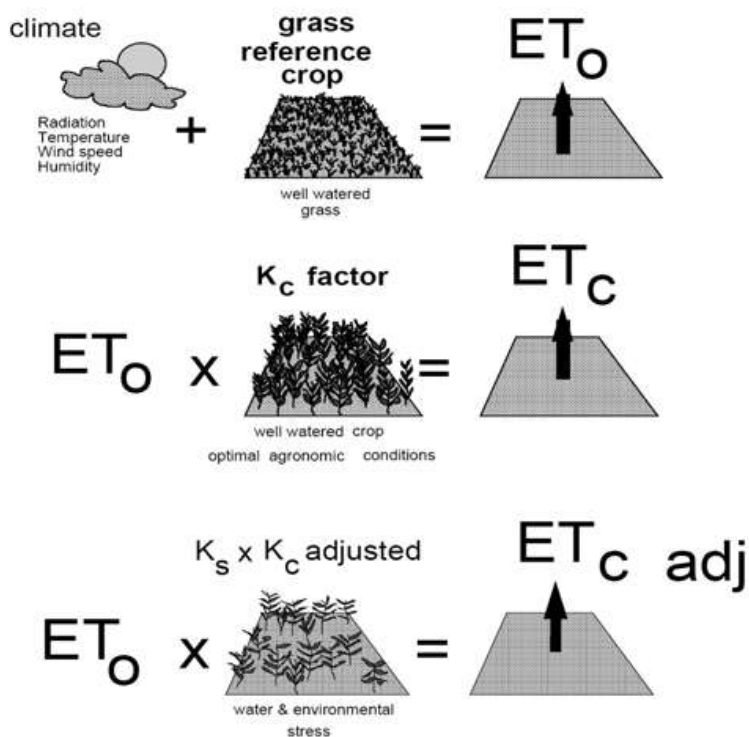


Fig. 6.2 – i coefficienti per ottenere tre dei quattro tipi di evapotraspirazione (manca il Ca per ottenere la ET_{0a} , introdotta in questo lavoro, che sta tra ET_0 e ET_c)

Il risultato è l'evapotraspirazione reale. Il quaderno FAO n°56 si divide in 11 capitoli:

capitolo 1 – Introduzione all'evapotraspirazione

capitolo 2 – Descrizione dell'equazione di Penman Monteith

capitolo 3 – Dati meteorologici

capitolo 4 – Determinazione della ET_0

capitolo 5 – Introduzione alla evapotraspirazione colturale (ET_c)

capitolo 6 – ET_c – single crop coefficient (K_c) – **riporta le durate delle fasi fenologiche e i valori dei K_c delle varie colture**

capitolo 7 – ETc – double crop coefficient ($K_c = K_{cb} + K_e$) – come per il capitolo 6 ma vengono riportati i K_{cb} (sola traspirazione) mentre la K_e si calcola a parte

capitolo 8 – ETc in condizioni di stress idrico del suolo (K_s)

capitolo 9 – ETc per le aree naturali o in condizioni non tipiche o non ottimali

capitolo 10 – ETc sotto diversi tipi di gestione colturale

capitolo 11 – ETc nei periodi di non crescita

Vi sono poi numerosi annessi; quello utilizzato nel presente studio è l'annesso 7: "Background and computations for K_c for the initial stage of annual crops".

In questo lavoro si è ampiamente consultata la parte dei primi 5 capitoli e poi adoperati nello specifico il capitolo 6, parte del capitolo 7, capitolo 8, capitolo 9. Si è poi utilizzato l'annesso 7. Il capitolo 9 sembra dare risposta alla richiesta di ottenere i K_c per le aree non a seminativo, in realtà è utilizzabile solo una formula per calcolare il K_c per gli alberi nella fase intermedia (ma comunque indispensabile).

6.2 – I COEFFICIENTI COLTURALI

6.2.1 – *Single crop coefficient or double crop coefficient?*

La evapotraspirazione è determinata da:

- a) evaporazione dalla superficie del suolo nudo
- b) evaporazione dalle superfici delle piante
- c) traspirazione delle piante

Con l'utilizzo del doppio coefficiente l'evapotraspirazione viene suddivisa in evaporazione + traspirazione (K_e per l'evaporazione, K_{cb} per la traspirazione) ed è un metodo molto preciso, adatto alla stima in tempo reale dell'acqua di irrigazione, per i calcoli di bilancio idrico del suolo, per studi di ricerca dove sono importanti gli effetti delle variazioni giornaliere nell'umidità della superficie del suolo nonché gli impatti risultanti nella stima della ETcR e i flussi della percolazione profonda. Sono esattamente gli obiettivi di questo studio. Il coefficiente unico (K_c) invece considera entrambe le componenti ed effettua una media (multi-giornaliera) della differenza tra evapotraspirazione della coltura (infatti non dimentichiamo che il tutto è originariamente finalizzato alle colture) e l'evapotraspirazione della coltura di riferimento (erba alta 12 cm...). Può venire utilizzato anche a scala temporale giornaliera ma non è la sua elezione, l'ideale è scala settimanale o per un periodo più lungo. Il problema, ad esempio, è che la stima dell'evaporazione può risultare errata.

Nonostante quanto sopra scritto, in questo lavoro si è adoperato il singolo K_c ma a scala giornaliera; lo scopo è stato non gravare troppo sulla complessità del modello, già ricco di innumerevoli parametri. Inoltre l'uso del doppio coefficiente presentava delle difficoltà metodologiche e procedurali che vanno sistemate, nel caso si decidesse di rendere ancor più dettagliato il modello utilizzando questa procedura. Per quanto riguarda il problema dell'evaporazione dai suoli, il quaderno FAO ha previsto comunque l'utilizzo di una correzione per la fase iniziale delle colture (in cui la traspirazione è minima poiché le colture sono non ancora nate o giovanissime) che tenga in considerazione quanto è piovuto, con che intervallo, in quali tipi di suoli, con quanta ET₀ (ET₀ in mm/giorno); il K_c ottenuto è stato da noi chiamato **K_c TN** ovvero **coefficiente da terreno nudo** poiché nelle fasi iniziali il terreno è nudo (appena seminato la terra è ancora scoperta). Se la fase iniziale dura un mese il K_c TN va calcolato su quel mese. Al variare della scala temporale varia anche il valore del K_c TN. Nel presente lavoro si è cercato di rendere più preciso tale K_c TN calcolandolo su scala bisettimanale e per tutto l'anno, non solo per le fasi iniziali delle colture (o degli altri usi del

suolo); la scala bisettimanale è risultata quella giusta per garantire precisione ed evitare eccessive fluttuazioni.

6.2.2 – I Kc delle fasi fenologiche

Durante il suo ciclo di vita la pianta ha un'evoluzione: dalla nascita si passa allo sviluppo, quindi c'è una fase di massimo sviluppo o maturità (di solito coincidente con la fioritura), infine la pianta inizia il declino ed entra nella fase di senescenza: alcune si seccano completamente o quasi (grano, girasole...), per altre la fase finale termina con un intervento antropico (la *falciatura* per l'erba medica). In ogni caso, per una grande varietà di colture, sono state previsti coefficienti colturali (Kc) che rispondessero a questa domanda: "quanto è la ETmassima della coltura, in quel particolare momento del ciclo di vita, rispetto alla ET della coltura di riferimento (prato di erba alta 12 cm in condizioni idriche ottimali...)?". Ovvero, se abbiamo due particelle di suolo adiacenti, in una c'è erba (avente r_s di $0,70 \text{ s m}^{-1}$ e un albedo di $0,23$, cap. 5.3) costantemente mantenuta ad un'altezza di 12 cm e con rifornimento idrico costante, e in un'altra la nostra coltivazione (ad esempio orzo), anche questa in rifornimento idrico ottimale, se misurassimo (ad esempio giornalmente) la ET sopra queste due particelle quanto differirebbero tra loro, ovvero quanto è il loro rapporto? Infatti:

$Kc = ET_0 / ET_{coltura}$	equazione 6.2
----------------------------	---------------

In cui:

ET₀ evapotraspirazione della coltura di riferimento (in condizioni idriche ottimali)

ET_{coltura} = evapotraspirazione della coltura (in condizioni idriche ottimali)

Tale rapporto può variare ogni giorno, ma per ogni coltura sono stati calcolati 4 tipi di Kc per ognuna delle fasi fenologiche (fig. 6.3):

- Kc ini = Kc della fase iniziale
- Kc svil = Kc della fase di sviluppo: è proporzionale tra Kc ini e Kc mid
- Kc mid = Kc della fase intermedia
- Kc end = valore di arrivo del Kc al termine del ciclo di vita; durante la fase end il Kc è proporzionale tra Kc mid e Kc end

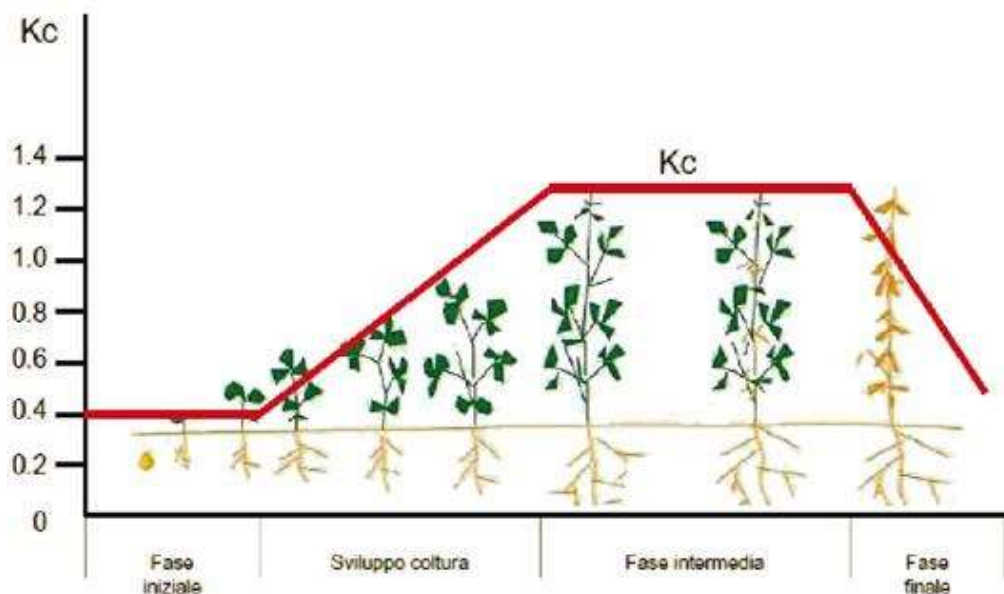


Fig. 6.3 – fasi fenologiche e corrispondenti valori di K_c per una generica coltura (dall'aspetto e dai valori potrebbe essere una leguminosa). $K_c = 1$ è il riferimento

I valori di K_c del quaderno FAO hanno un range di variazione tra 0,25 e 1,15, è un dato valore di K_c assegnato a un certo periodo può aumentare o diminuire a seconda delle condizioni climatiche medie della fase fenologica (umidità relativa minima e velocità del vento); inoltre può azzerarsi se la coltura non è presente e il K_{cTN} è 0, oppure può salire a valori sopra 1,3 per il massimo sviluppo delle piante. Il valore di $K_c = 1$ è il riferimento del prato d'erba con tutte le caratteristiche indicate: se $K_c > 1$ la $ET_{massima}$ della coltura è superiore alla ET del prato, viceversa se $K_c < 1$.

La evapotraspirazione reale colturale (ET_{cR}) invece viene calcolata considerando la effettiva disponibilità idrica della coltura (cap. 4, cap. 8).

6.2.3 – il coefficiente proporzionale delle fasi di sviluppo e della fase finale

Nella fase di sviluppo e nella fase finale il K_c è proporzionale e il suo andamento è lineare tra i due K_c (tra *iniziale* e *mid* oppure tra *mid* ed *end*). Per ottenere il valore di K_c in un determinato giorno sia nella fase di sviluppo che nella fase finale si utilizza la seguente formula del quaderno FAO n°56:

$$K_{ci} = K_{cprev} + \left[\frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{stage}} \right] (K_{cnext} - K_{cprev})$$

equazione 6.3

in cui:

$K_{c,i}$ = K_c per il giorno i (della fase di sviluppo o della fase finale)

i = numero del giorno dall'inizio della fase iniziale, per esempio nel 40° giorno $i = 40$;

K_{cprev} = K_c iniziale o K_{cTN} (o K_c mid per la fase finale)

K_{cnext} = K_c mid (o K_c end considerando la fase finale)

L_{stage} = lunghezza del periodo della stagione di crescita (o della stagione di senescenza per la fase finale)

$\sum(L_{prev})$ = lunghezza della fase iniziale (o somma di tutte le precedenti fasi considerando la fase finale)

Questa equazione si applica a tutte le 4 stagioni se ad esempio non si considerano costanti i valori di K_c mid e K_c iniz.

6.2.4 – La correzione climatica dei coefficienti

D'ora in avanti chiameremo i K_c riportati nel quaderno FAO 56 "Kc tabellati". Saranno definiti "Kc tabellati" anche i K_c ottenuti da altre fonti, ma che sono di riferimento: poi i K_c tabellati saranno interpolati con il coefficiente da terreno nudo K_{cTN} per ottenere i "Kc effettivi" (si veda in seguito). I valori dei K_c (ini, mid, end) riportati nella tabella del quaderno FAO 56 (tab. 12, ch.6) sono stati ottenuti in condizioni standard ovvero per umidità relativa minima (RH_{min}) = 45% e per velocità del vento a 2m di quota (U_2) = 2m/s (valori medi della fase mid o end). Se le condizioni climatiche differiscono occorre applicare una correzione ai K_c tabellati; la correzione va applicata alle componenti di uso del suolo (cap. 3.4): infatti i K_c delle classi di uso del suolo (cap. 3.3) sono ottenuti dai K_c delle componenti delle classi secondo le % riportate in tab. 3.2. La correzione si applica solo al K_c mid e al K_c end: **il K_c aumenta se $RH_{min} < 45\%$ e se $U_2 > 2m/s$ e viceversa**. Per quanto riguarda il K_c end, la correzione non si applica se K_c end $< 0,45$, valore che presuppone che la coltura sia secca: infatti se una coltura viene lasciata seccare in campo prima della raccolta (come ad esempio i cereali) l'effetto di RH_{min} e U_2 hanno minore importanza, anzi per K_c end $< 0,45$ la diminuzione di RH_{min} provoca la diminuzione di K_c end (di solito è il contrario, se l'umidità è minore o in calo l'evapotraspirazione è maggiore o in aumento).

$K_{c\text{mid}} = K_{c\text{mid}(\text{Tab})} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$	equazione 6.4
--	---------------

in cui:

U_2 = velocità media del vento (m/s), durante la stagione vegetativa (periodo mid), a 2 metri di altezza sopra l'erba, per $1 \leq U_2 \leq 6$

RH_{min} = valore medio dei valori minimi giornalieri di umidità relativa nella stagione vegetativa (%) per $20 \leq RH_{min} \leq 80$

h = altezza media massima delle piante (m) per $0,1 \leq h \leq 10$

L'equazione per la fase end è la stessa.

Per il calcolo sono stati utilizzati:

- per l'umidità relativa: media delle medie giornaliere di RH_{min} delle 3 stazioni meteo dell'Osservatorio Serpieri a più bassa quota;
- per la velocità del vento: media oraria registrata dalla stazione meteo della Sogesta che è posta a una altezza dal suolo di 2,5 m, quindi è stato necessario correggere il valore e riportarlo a 2m. È stata scelta la stazione meteo della Sogesta rispetto a quella di Urbino e della Cesane in quanto, secondo il personale dell'Osservatorio, ha un'esposizione ai venti

inferiore e quindi rispecchia meglio il campo di vento del bacino; la stazione meteo di Fermignano è stata esclusa in quanto si trova fuori bacino (ma è stata comunque utilizzata per l'umidità relativa);

- l'altezza massima delle colture è stata ottenuta dal quaderno FAO o da osservazioni di campagna e riportata nella tabella 6.1

componente delle classi di uso suolo	RH _{min} (%)	Vento (m/s)	RH _{min} (%)	Vento (m/s)	(in metri)	
	fase mid		fase end		H max	H corr
grano	35,8	2,08	44,8	1,95	1	0,8
girasole	44,8	2,06	50,1	2,04	2	1,8
vigneto	45,5	2,09	55,1	1,60	1,5	1,3
erba medica	42,3	1,87	45,3	3,04	0,7	0,6
avena	39,8	2,05	41,2	2,26	1	1
menta	41,4	1,95	43,8	2,01	0,7	0,6
ginestre	41,6	1,97	43,7	1,85	2	1,8
piccoli alberi e arbusti	46,0	1,97	57,7	1,17	3	3
alberi (roverelle)	46,0	1,97	59,5	1,20	10	10

Tab. 6.2 – dati di RH_{min} e di U₂ per le fasi mid ed end delle componenti di uso del suolo per l'anno 2014. Sono riportate anche le altezze massime delle colture (da letteratura) e le altezze massime corrette secondo il caso locale

I valori delle altezze massime sono ottenuti dal quaderno FAO tranne che le ginestre/piccoli alberi/alberi per cui si sono trovate altre fonti o ci si è basati su osservazioni di campagna (queste ultime hanno portato anche a una correzione delle altezze tabella FAO). I valori della tabella 6.2 variano ogni anno idrologico: eccezione è l'altezza massima delle colture/piante per cui si è supposta invariante. Le durate delle fasi fenologiche sono riportate in fig. 6.14 e tab. 6.5.

6.3 – IL COEFFICIENTE DA TERRENO NUDO KcTN

Nelle fasi iniziali della coltura l'evaporazione gioca un ruolo fondamentale poiché le piante/erbe sono molto piccole: questo può valere anche per gli alberi/arbusti/ginestre pluriennali se si considera che l'inizio della stagione vegetativa coincide con bassa traspirazione e spesso anche con abbondanti piogge che forniscono molta acqua ai terreni. Con l'avvento della stagione di sviluppo e di maturità (fasi sviluppo e mid) vi è un'inversione tra il ruolo dell'evaporazione e della traspirazione, per poi tornare ai rapporti iniziali al termine della stagione end (ma poi dipende quando questo accade); la fig. 6.4 illustra questo effetto.

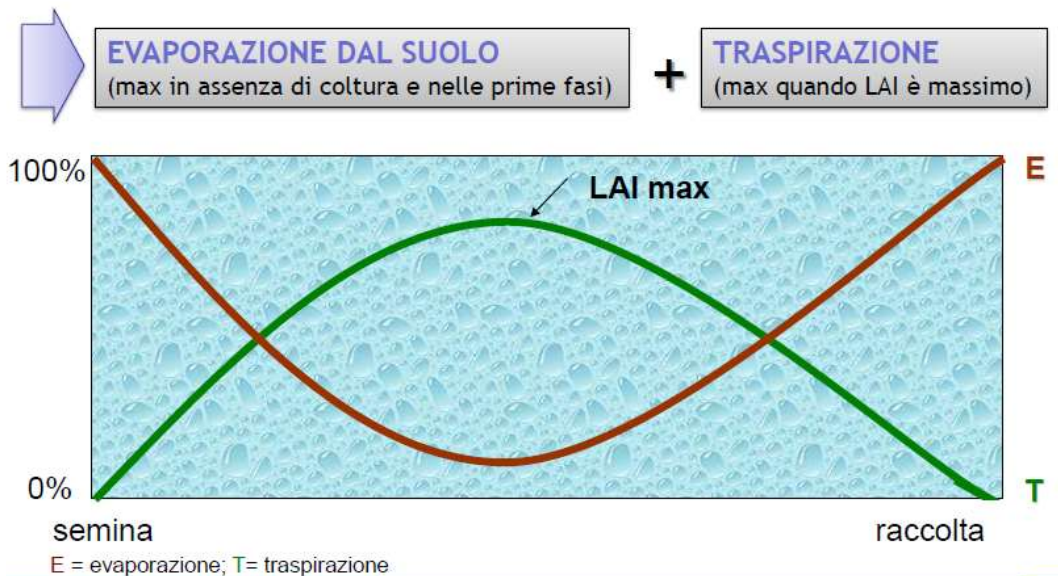


Fig. 6.4 – rapporti tra evaporazione dal suolo e traspirazione delle piante o colture durante il ciclo di vita della coltura. LAI = leaf area index = indice della copertura fogliare della coltura (max LAI = max traspirazione)

Il quaderno FAO fornisce K_c per la fase iniziale delle colture (non per le piante, arbusti, ecc.) ma consiglia di calcolare il K_c ini considerando, per la durata della fase iniziale:

1. intervallo di tempo tra eventi di pioggia; più frequenti sono le piogge o l'irrigazione (quest'ultima non nel caso di studio) e maggiore quantità di acqua sarà disponibile per l'evaporazione e maggiore sarà K_{cTN} ;
2. potere evaporante dell'atmosfera: maggiore è il potere evaporante (= maggiore ET_0) più rapidamente il suolo si asciugherà e resterà meno acqua a disposizione per evaporare: il K_{cTN} tende a diminuire. È vero che sia la ET_0 che la evaporazione da terreno nudo dipendono circa dai medesimi fattori (temperatura, umidità relativa e altro) ma per l'evaporazione da terreno nudo conta la quantità di acqua presente nel terreno (ET_0 considera rifornimento idrico ottimale);
3. grandezza degli eventi di pioggia: se la pioggia è abbondante e di intensità moderata in modo da favorire sia la trattenuta dell'acqua negli avvallamenti di terreno che l'infiltrazione nei primi strati del suolo allora sarà presente una notevole quantità di acqua per l'evaporazione: K_{cTN} tende ad aumentare. Si ricorda che l'evaporazione interessa anche l'acqua fino a una certa profondità.

I fattori 1, 2 e 3 si determinano nel seguente modo (di cui ci sono esempi):

1. gli eventi di pioggia sono indicati nel quaderno FAO come "di alcuni mm". Per questo studio è apparso un giusto valore assegnare un evento a una precipitazione di almeno **3,5 mm**. Gli eventi di pioggia che avvengono in giorni adiacenti sono da considerarsi come un singolo evento. Poi entra in gioco la discrezionalità: se in una doppia-settimana (range temporale per il calcolo del K_{cTN}) ci sono una serie di eventi < 3,5 mm ma che assieme portano a superare i 3,5 mm, si assegna un evento; se ci sono 4 giorni consecutivi di pioggia abbondante si sono assegnati 2 eventi, e così se ce ne sono 3 ma con un giorno avente pioggia molto abbondante (>50mm). Allora supponendo in maggio (31 gg) 4 eventi di pioggia

- (per esempio di almeno 3,5 mm ciascuno) allora il fattore 1 = $31/4 \approx 1$ evento ogni 7,8 giorni (se si considera l'intera fase iniziale si divide il numero di gg della fase iniziale);
2. il potere evaporante viene descritto come mm di evapotraspirazione potenziale di riferimento al giorno; se ad esempio in maggio $ET_0 = 80$ mm allora il fattore 2 = $80/31 \approx 2,6$ mm/giorno;
 3. la grandezza degli eventi di pioggia si riferisce a quanto piove in media negli eventi di pioggia di cui al punto 1. Se ad esempio a gennaio sono piovuti complessivamente 80 mm di pioggia allora il fattore 3 = $80/4 = 20$ mm/evento.

Per la determinazione del coefficiente KcTN se il fattore 3 è inferiore a 10 mm/evento si utilizza il grafico di fig. 6.5. Nel grafico il fattore 2 va inserito in ascissa e il fattore 1 è rappresentato dalle curve di frequenza eventi di pioggia. Si notano i seguenti aspetti:

- per un medesimo valore di ET_0 giornaliera il KcTN aumenta all'aumentare della frequenza degli eventi di pioggia o degli eventi irrigui (maggiore acqua disponibile per l'evaporazione);
- per un medesimo valore del fattore 1 il KcTN aumenta al diminuire della ET_0 giornaliera in quanto il potere evaporante è inferiore e il suolo resta più umido: c'è più acqua a disposizione per l'evaporazione. Inoltre dato che il fattore 2 più basso significa ET_0 mensile più bassa allora il Kc, che è indice di quanto la coltura o il terreno nudo si discostano dalla ET_0 , aumenta poiché la stessa ET_0 è più bassa.

Per la determinazione del coefficiente KcTN, se il fattore 3 è superiore a 40 mm/evento, si utilizzano:

- la fig. 6.6 per terreni a grana grossolana;
- la fig. 6.7 per terreni a grana media e fine.

I terreni a grana grossolana sono quelli a tessitura sabbiosa, sabbioso-franca.

I terreni a grana media sono quelli a tessitura franco-sabbiosa, franca, limoso-franca e limosa. I terreni a grana fine sono quelli a tessitura franco-limoso-argillosa, argilloso-limoso e argillosa.

I terreni del bacino Santa Maria degli Angeli appartengono alla classe dei terreni a tessitura media e fine (gli orizzonti del profilo realizzato sono a tessitura franco-limoso-argillosa e franca, cap. 8).

Si noti come, a parità di ET_0 giornaliera e di frequenza eventi di pioggia, in terreni a tessitura grossolana in cui l'infiltrazione è maggiore il Kc assuma valori inferiori poiché resta meno acqua disponibile in superficie per l'evaporazione.

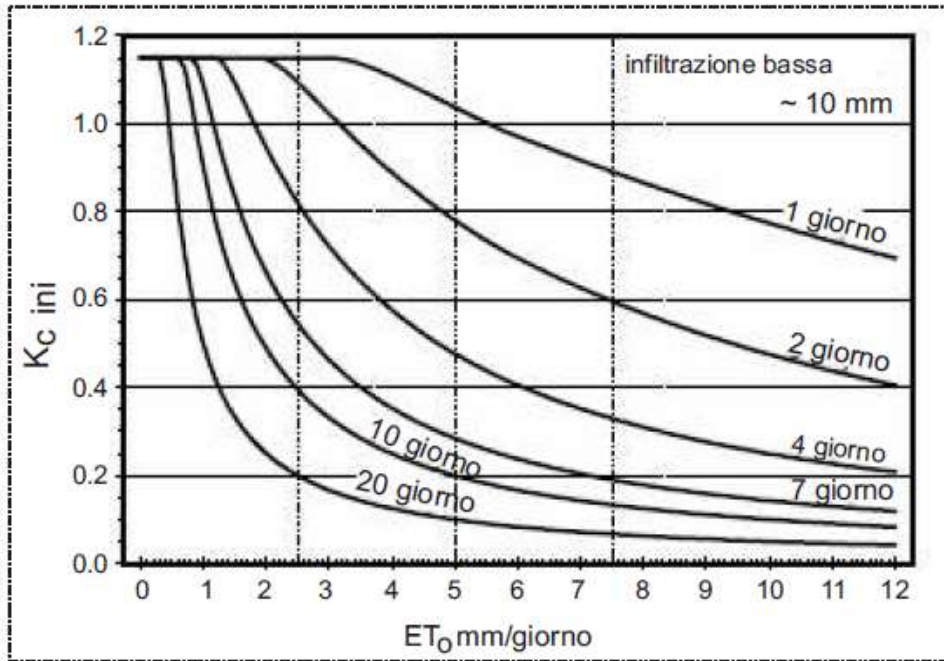


Fig. 6.5 – grafico per la determinazione del KcTN per un evento inferiore a 10 mm e per tutti i tipi di terreno (da quad. FAO 56 rielaborato)

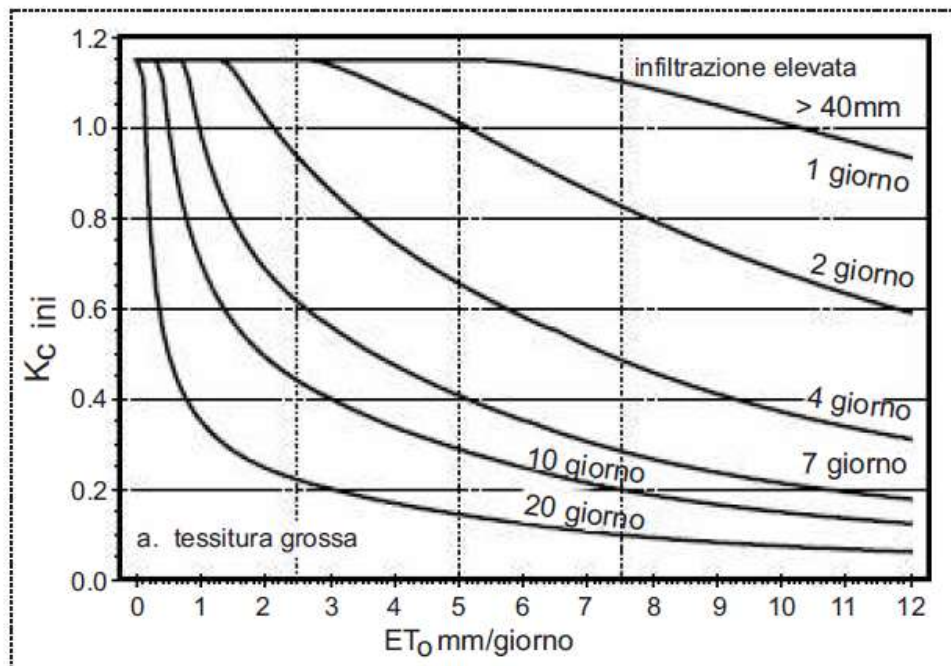


Fig. 6.6 – grafico per la determinazione del KcTN per un evento maggiore di 40 mm e per terreni a tessitura grossolana (da quad. FAO 56 rielaborato)

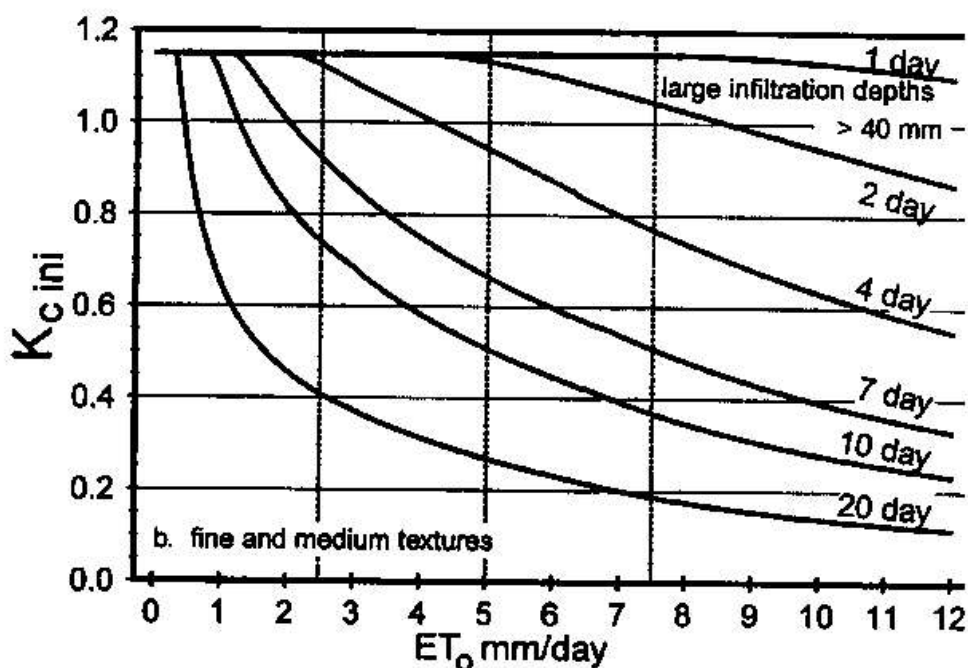


Fig. 6.7 – grafico per la determinazione del Kc_{TN} per un evento maggiore di 40 mm e per terreni a tessitura medio-fine (da quad. FAO 56)

Confrontando i tre grafici si nota come, a parità di ET_0 e di frequenza eventi di pioggia, quando la grandezza degli eventi è bassa (sotto 10mm) il Kc_{TN} sia inferiore poiché l'acqua a disposizione per l'evaporazione è inferiore. Basti osservare per esempio il Kc_{TN} corrispondente a fattore 2 = 2,5 mm/evento e a fattore 1 = 7 gg con cui si hanno i seguenti valori di Kc :

- per grandezza eventi < 10 mm/evento: $Kc \approx 0,55$
- per grandezza eventi > 40 mm/evento e per terreni a grana grossa: $Kc \approx 0,62$
- per grandezza eventi > 40 mm/evento e per terreni a grana medio-fine: $Kc \approx 0,9$

Nel nostro esempio non si può utilizzare nessuna delle tre figure poiché il fattore 3 = 20 mm/evento. Nel caso intermedio si adopera la seguente equazione:

$Kc_{TN} = Kc_{TN} \text{ (fig. 9.5)} + (I-10)/(40-10) \cdot [Kc_{TN} \text{ (fig. 6.6 o 6.7)} - Kc_{TN} \text{ (fig. 6.5)}]$	equazione 6.4
---	---------------

dove:

Kc_{TN} (fig. 6.5) = valore di Kc_{TN} (o di Kc_{iniz}) ricavato dalla figura 6.5;

Kc_{TN} (fig. 6.6 o 6.7) = valore di Kc_{TN} (o di Kc_{iniz}) ricavato dalla figura 6.6 o 6.7;

I = profondità media di infiltrazione (fattore 3 in mm)

Con i dati del nostro esempio, supponendo di avere terreni a grana medio-fine:

fattore 1 = 7,8 gg (1 evento di pioggia ogni 7,8 giorni)

fattore 2 = 2,6 mm/giorno

fattore 3 = 20 mm/evento

si ottengono i seguenti valori di Kc :

dalla fig. 6.5 : $Kc = 0,49$

dalla fig. 6.7 : $Kc = 0,85$

Dall'equazione 6.4 si ottiene:

$$KcTN = 0,49 + (20-10)/(40-10) \cdot [0,85 - 0,49] = 0,61$$

Per ottenere un valore di KcTN più preciso non si sono utilizzati i grafici di fig. 6.5, 6.6 e 6.7 ma il metodo numerico riportato sull'annesso 7 del quaderno FAO (equazione 7.3 e successivi). Il metodo numerico è più complesso ma permette di effettuare calcoli oggettivi (trovare le corrispondenze sul grafico può essere soggettivo): i principi comunque sono quelli illustrati.

Il KcTN è stato calcolato a scala bi-settimanale poiché, dipendendo molto dalla scala di applicazione, a scala minore (mensile) non offriva adeguata precisione, a scala maggiore (settimanale) presentava troppe oscillazioni (può passare da 1,15 a 0 in una settimana se non ci sono piogge, può accadere anche a scala bisettimanale ma è più raro). Le piogge e la ETO usate come input sono Pa ed ETOa.

Il grafico di fig. 6.8 riporta l'andamento mensile di precipitazioni (Pa) ed ETOa (input per KcTN) e di KcTN per l'anno 2015 (a livello grafico il mensile è più chiaro). Si nota come il calo delle piogge e l'aumento della ETOa porti a un crollo del KcTN nei mesi estivi e poi a una risalita; è un trend comune a tutti gli anni pur con differenze in termini di valori e distribuzione valori. Si nota anche l'anomalo crollo nei mesi di novembre e dicembre, dovuto alle scarsissime precipitazioni in quei mesi del 2015 (soprattutto di dicembre).

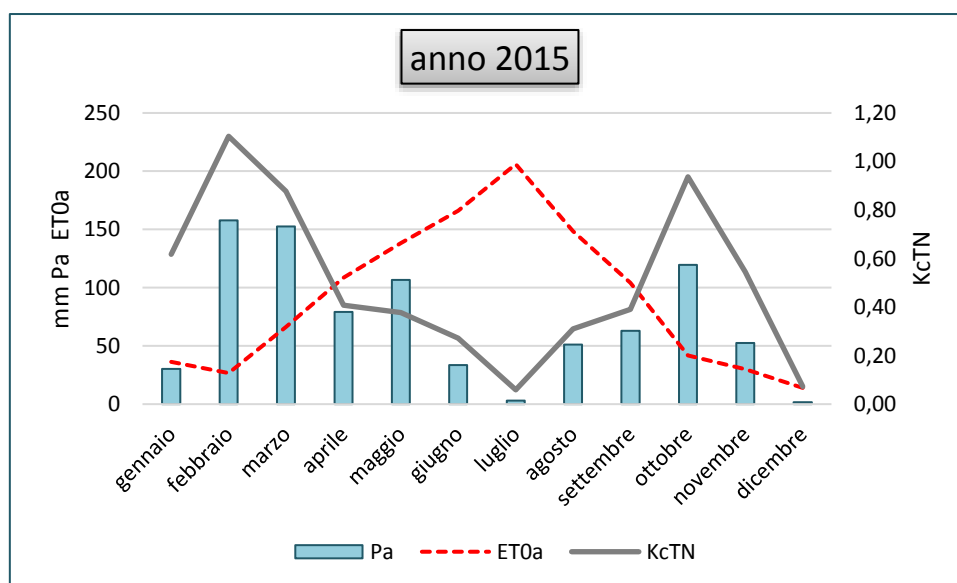


Fig. 6.8 – andamento mensile del KcTN nell'anno 2015

6.4 – I COEFFICIENTI CULTURALI DI ALCUNE DELLE COMPONENTI DI USO DEL SUOLO

6.4.1 – Riassunto sulle classi e componenti di uso del suolo

Come spiegato nel capitolo 3 le classi di uso del suolo sono formate da componenti di uso del suolo. Alcune classi corrispondono interamente con le componenti: possiamo definirle “**classi uniche**”; sono in pratica le colture per cui sono presenti Kc tabellati (grano, girasole, erba medica, vigneto). Vi sono poi le classi di uso del suolo formate da più componenti: possiamo definirle “**classi miste**”; sono in pratica le aree parzialmente accantonate dall'agricoltura (terreni a riposo) oppure abbandonate e in via di rinaturalizzazione (incolti, boschi radi, parte dei boschi) o del tutto naturali (parte dei boschi). Anche le “aree presso edificato” sono una classe mista. Sotto si riporta la tabella

3.2. Caso particolare sono i terreni a riposo, formati dalle componenti “avena” e “menta”; i terreni a riposo poi rappresentano in toto la componente “erba” che è componente degli incolti, boschi radi, boschi, aree presso edificato. In giallo sono riportate le classi uniche, in verde le classi miste.

CLASSI DI USO DEL SUOLO	COMPONENTI DELLE CLASSI DI USO DEL SUOLO	% CON CUI LE COMPONENTI FORMANO LE CLASSI
Aree totalmente impermeabili	impermeabile	100%
Area presso edificato	Impermeabile	35%
	Erba	30%
	Arbusti/piccoli alberi	15%
	Alberi	20%
Seminativi a grano	Grano	100%
Seminativi a girasole	Girasole	100%
Seminativi a foraggio (erba medica)	Foraggio (erba medica)	100%
Vigneto	Vigneto (vite)	100%
Terreni a riposo (erba)	Menta	50%
	Avena	50%
Incolti	Erba	45%
	Ginestre	35%
	Arbusti/piccoli alberi	10%
	Alberi	10%
Boschi radi	Erba	20%
	Ginestre	15%
	Arbusti/piccoli alberi	15%
	Alberi	50%
Boschi	Erba	10%
	Ginestre	5%
	Arbusti/piccoli alberi	10%
	Alberi	75%

Tab. 6.3 che riprende la 3.2 – classi di uso del suolo e componenti delle classi di uso del suolo

Appare chiaro che il calcolo dei Kc delle classi coincide con il Kc delle componenti per le classi uniche, mentre è una media pesata dei Kc delle componenti per le classi miste. L’esempio della sezione 6.6 sarà esplicativo. Per ora si forniscono spiegazioni sulla scelta dei Kc di alcune componenti di uso del suolo, per le altre si rimanda alla tabella 6.5 e alle note in calce. È alle componenti che debbono essere assegnati i Kc, le classi poi li acquisiscono di conseguenza. È necessaria l’interazione con il KcTN (si veda esempio).

6.4.2 – il calcolo del Kc per l'erba medica (alfalfa)



Fig. 6.9 – erba medica in fiore (giugno-luglio circa)

L'erba medica è una coltura differente dalle altre, così come tutte le foraggere. Infatti un impianto di erba medica dura 4-5 anni a seconda dei casi, quindi occorre considerare anche la stagione invernale, periodo di *dormancy*. Durante il ciclo vegetativo, invece, ci possono essere 3-4 tagli a seconda della stagione: ad ogni taglio il Kc crolla e re-inizia dal Kc ini (fig. 6.4).

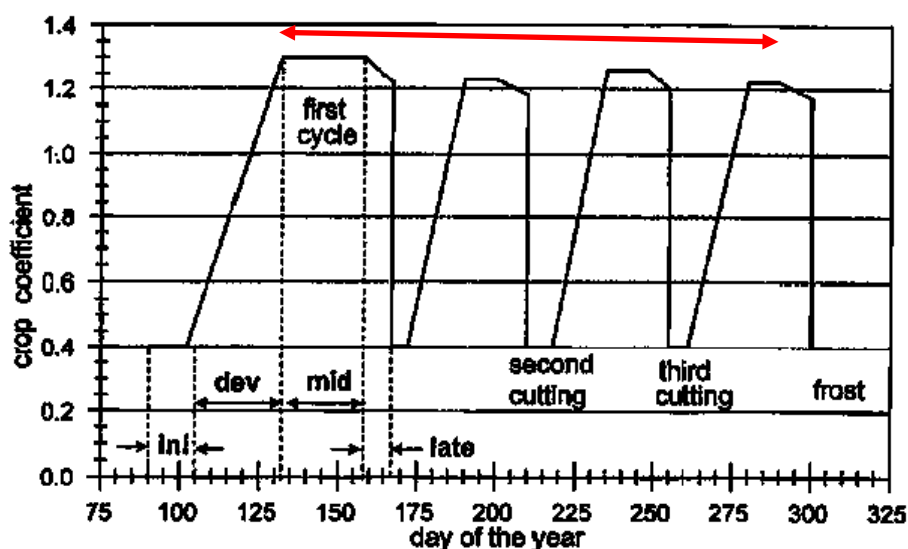


Fig. 6.10 – cicli di taglio di un impianto di erba medica (Idaho, USA) con relativi Kc e durata delle varie fasi. La freccia indica il periodo dal termine del primo sviluppo all'inizio dell'ultima fase end

In questo lavoro si è adottato il metodo (previsto dal quad. FAO) di utilizzare un Kc unico (= 0,95) che mediasse i vari "alti e bassi" tra la fine del primo sviluppo e l'inizio dell'ultima fase end (periodo indicato in freccia rossa nella fig. 6.10). Per quanto riguarda il periodo di dormienza, se l'impianto è di nuova costituzione la parte iniziale dell'anno (gennaio-febbraio-marzo, fino al 1 aprile in cui comincia la fase iniziale nel bacino SMA) vede suolo nudo, e quindi si usa il KcTN. Diverso è il discorso per il post-ultimo taglio (da 29 agosto al termine dell'anno) e per i primi mesi dell'anno se l'impianto è dal secondo anno in su: la coltura è presente e occorre mettere un valore di Kc: il valore minimo di 0,4 appare adeguato.

6.4.3 – il calcolo del Kc per i terreni a riposo ed avena selvatica/menta selvatica



Terreno a riposo; si nota bene l'avena selvatica con le tipiche "reste" (infiorescenze)



Avena selvatica (avena fatua)



Menta selvatica (mentha longifolia) in fiore

Fig. 6.11 – terreni a riposo con i suoi costituenti avena selvatica e menta selvatica

I terreni a riposo vengono lasciati incolti per uno o più anni (per rotazione, per obbligo PAC, ecc.), ma senza abbandono. Una volta l'anno sono soggetti a trinciatura. Quella dei terreni a riposo è una classe di uso del suolo un po' particolare in quanto è rappresentante della categoria "erba" che, assieme a ginestre, arbusti/piccoli alberi e alberi forma, in diversa %, la composizione delle classi di uso "miste" (incolti ecc.). Quindi è classe e componente al tempo stesso. È tuttavia stata modellata come composta di due ulteriori componenti: avena selvatica e menta selvatica. Nei terreni a riposo infatti hanno dimora sia le erbe spontanee annuali che quelle pluriennali: come rappresentante delle prime si è assunta l'avena selvatica, per la seconda la menta selvatica. I valori dei Kc sono stati presi dal quaderno FAO (si sono presi i valori delle varietà coltivate); le durate delle fasi fenologiche sono state prese dal quaderno FAO (avena) o ipotizzate sulla base di osservazioni di campagna (menta). Si è assunto che metà del terreno a riposo fosse coperto da avena e metà da menta.

6.4.3 – il calcolo del K_c per le ginestre (*spartium junceum*)



Fig. 6.12 – cespuglio di ginestra (*spartium junceum*) in fiore (maggio-giugno circa)

Nelle classi di uso suolo miste “incolti” e “boschi radi” i principali arbusti sono le ginestre (*spartium junceum*) che di norma emergono in seguito all'abbandono dei coltivi. Le uniche informazioni tabellate nel quaderno FAO sono per il gruppo dei “berries”. I valori dei berries non sono comunque appropriati poiché le ginestre sono sempreverdi e l'unico lavoro che tratta di coefficienti colturali delle ginestre (WUCOLS III, University of California) le indica come arbusti a consumo idrico molto basso con $K_s < 0,1$. Il K_s riportato è un fattore di specie che, sommato a un fattore di densità e a un fattore microclimatico fornisce un “landscape coefficient” adatto per stimare i consumi idrici di piante ornamentali tra cui è annoverata anche la ginestra; sono valori relativi al territorio della California (USA). In particolare i valori di K_s sono basati su studi di fabbisogni idrici di specie ornamentali e su studi di applicabilità di K_c colturali. Come il K_c anche il K_s è una frazione dell' ET_0 ma mentre il prodotto $K_c \cdot ET_0$ riporta l'evapotraspirazione potenziale della coltura (quindi in condizioni idriche ottimali) il prodotto $K_s \cdot ET_0$ rappresenta la minima richiesta d'acqua della specie ornamentale per mantenere accettabili apparenza, salute e ragionevole crescita (come indicato nella tab. 2 della guida, scaricabile da internet). Il K_s varia da valori $< 0,1$ fino a $0,9$ per specie ad alta richiesta d'acqua. Fornire in questo lavoro un valore di K_c per gli arbusti (prevalentemente ginestre) paragonabile al K_s ($< 0,1$) non sembra appropriato ma le caratteristiche di basso consumo idrico delle stesse vanno tenute in considerazione. Si sono così utilizzati valori di $0,15$ per la fase dormiente invernale e di $0,3$ per i mesi di massimo sviluppo. Si è tenuto anche conto che nel quaderno FAO viene indicato che per frutteti sempreverdi la variazione tra K_c iniz. (che è il valore dopo la fase dormiente invernale) e il valore del K_c mid è inferiore rispetto a frutteti caducifoglie.

Per quanto riguarda la durata delle fasi fenologiche della ginestra si sono utilizzate osservazioni di campagna ponendo la stagione intermedia in maggio, giugno e luglio (periodo di massima fioritura e di presenza dei frutti); la fase di sviluppo e finale sono state poste indicativamente in un mese e mezzo prima e dopo la fase intermedia.

6.4.4 – il calcolo del Kc per gli arbusti/piccoli alberi

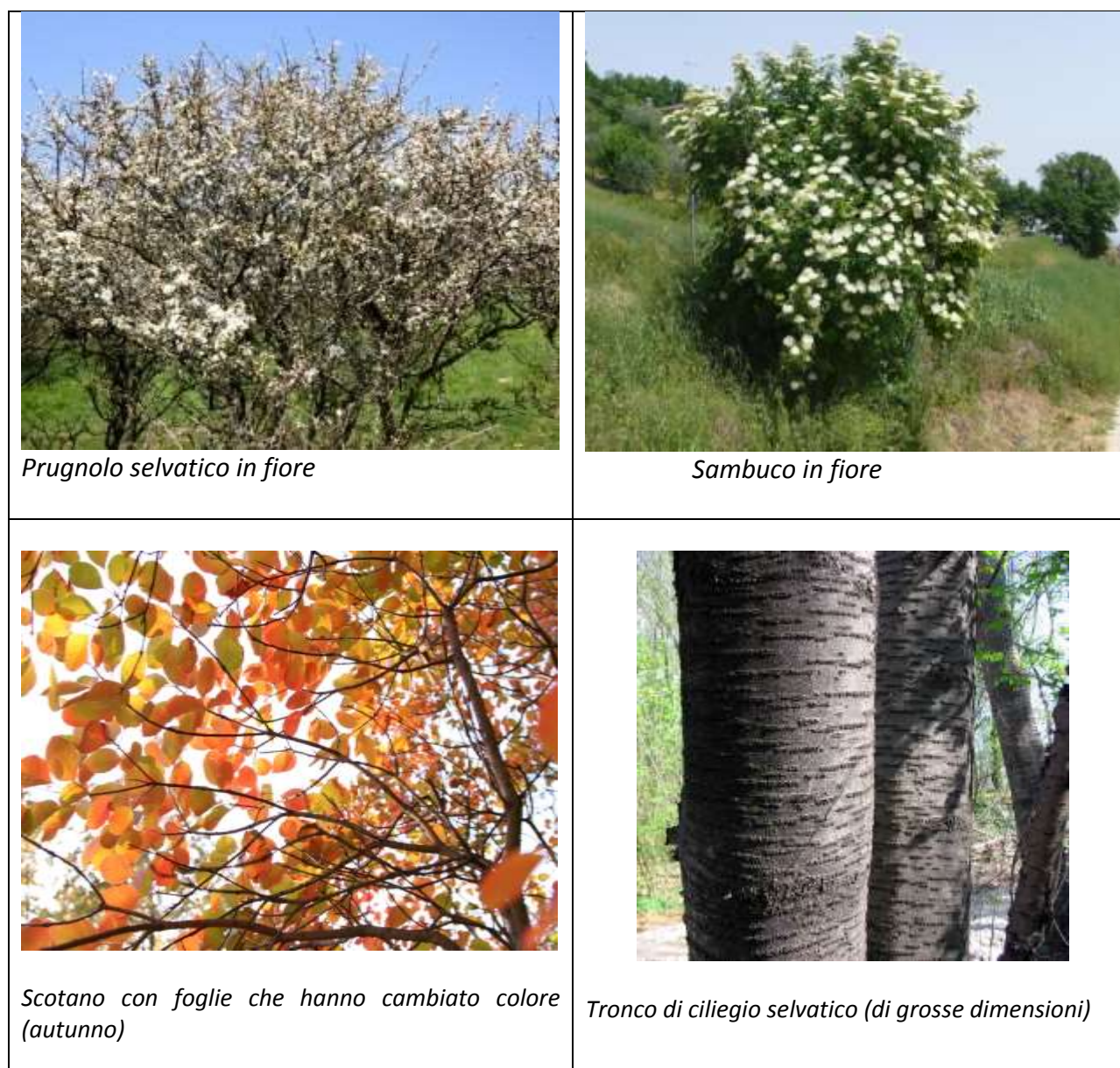


Fig. 6.13 – alcune specie appartenenti alla componente di uso suolo “arbusti/piccoli alberi”

Questa componente di uso del suolo comprende tutti gli arbusti non ginestre (scotano, prugnolo selvatico...) e alberi di piccole dimensioni (sambuco, piccoli olmi, ciliegio selvatico...). Per la definizione dei valori di Kc ci si è basato solo sui valori del quaderno FAO, utilizzando i valori delle colture che sembravano più avvicinarsi (per caratteristiche morfologiche e fenologiche) alle tipologie di specie di questo gruppo. I valori sono indicati nella tabella 6.4. Per quanto riguarda la durata delle fasi fenologiche, è stata assunta essere coincidente con quella degli alberi. Per la fase dormiente invernale si è assunto un valore di 0,5, pari al valore della fase iniziale; questo valore è relativo ai mesi da gennaio all’inizio della fase vegetativa, mentre dal termine della fase “end” al 31 dicembre vi è una seconda fase (“end 2”) in cui il Kc scende da 0,65 a 0,5. Questa seconda fase end è caratteristica anche degli alberi. I valori di Kc ini (0,5), Kc end 1 (0,65) e Kc end 2 (0,5) sono stati infatti assegnati anche agli alberi.

coltura FAO/fase	initial	mid	end
berries	0,3	1,05	0,5
almonds	0,4	0,9	0,65
apples, cherries, pears	0,6	0,95	0,75
apricots, peaches...	0,55	0,9	0,65
olives	0,65	0,7	0,7
media per arbusti/piccoli alberi	0,5	0,9	0,65

Tab. 6.4 – calcolo dei valori per la componente di uso suolo “arbusti/piccoli alberi”

No ground cover, no frost per le colture FAO riportate in tab. 6.4 poiché si considera solo l’arbusto/pianta; per le olive: 40-60% copertura

6.4.5 – il calcolo del Kc per gli alberi



Fig. 6.14 – albero isolato di roverella (*quercus pubescens*) di grandi dimensioni

In questa componente rientrano tutti gli alberi di medio-grandi dimensioni, come possono essere quelli di boschi maturi e piante isolate (fig. 6.14). Sono soprattutto querce roverelle ma possono comprendere anche carpini, ornielli, olmi, pioppi bianchi e neri, ecc.

I valori dei Kc ini (che corrisponde anche alla fase dormiente) e del Kc end sono presi dalla componente “arbusti/piccoli alberi”; per la durata delle fasi fenologiche, assegnata anche alla componente “arbusti/piccoli alberi”, ci si è basati sul lavoro di Eccel et al., 2007 (fig. 6.15), adeguandolo alla situazione del bacino SMA. Il lavoro di Eccel, tra le altre cose, calcola il Kc giornaliero per una foresta decidua alpina a querceto; si nota bene la salita in tempi relativamente rapidi del Kc in seguito alla salita del LAI, con l’accortezza che il picco di Kc può avvenire prima del picco di LAI poiché al massimo LAI ci può essere effetto di auto-ombreggiamento e resistenza al passaggio del vento (che fa aumentare la ETc). Da tale lavoro si è preso il modello di trend del Kc e del LAI e si è fatta la seguente assunzione: i primi mesi dell’anno costante (Kc=0,5 come arbusti/piccoli alberi), poi una salita in circa 45 giorni, 130 giorni di fase intermedia (Kc = X+Kcb mid, si veda in seguito), una prima discesa di 40 giorni (da Kc a 0,65, valore come arbusti/piccoli

alberi) e infine una seconda discesa più graduale (si nota nel grafico di Excel nel trend del LAI in particolare) da 0,65 a 0,5 – come per arbusti/piccoli alberi.

Eccel E *et al.* Italian Journal of Agrometeorology 32 - 43 (1) 2007

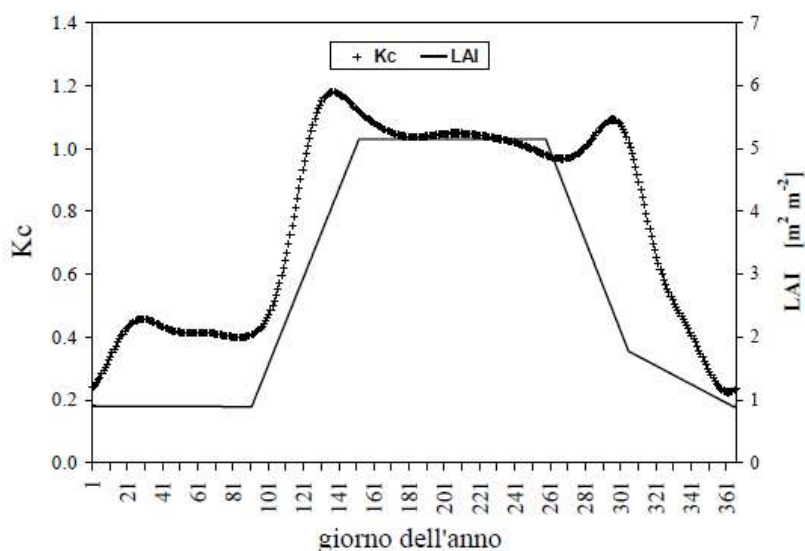


Fig. 6.15 – andamento del Kc per una foresta decidua alpina (Eccel *et al.*, 2007)

Per quanto riguarda la fase intermedia, per il calcolo del Kc si sono utilizzate le indicazioni del quaderno FAO n° 56 al capitolo 9: *ET_c for natural, non-typical and non-pristine vegetation*. Per “non pristine vegetation” si riporta la definizione del quaderno FAO: “*Non-pristine vegetation is defined, in the usage here, as vegetation having less than perfect growing conditions or stand characteristics (i.e., relatively poorer conditions of density, height, leaf area, fertility, or vitality) as compared to 'pristine' conditions*”. Può essere applicato alle aree incolte (o a seminativi in cui il raccolto, per diversi possibili motivi, non è in condizioni ottimali).

Il metodo può presentare diverse possibilità: in questo lavoro si è utilizzata la procedura seguente. Metodo del “single crop coefficient” (one step) “misto”.

$Kc_{mid} = Kcb_{mid} + X$	equazione 6.6
----------------------------	---------------

In cui:

Kc_{mid} è il valore da determinare;

Kcb_{mid} = coefficiente della media stagione relativo alla sola traspirazione. È attribuito a vegetazione quando la densità e/o l'area fogliare sono minori delle condizioni di totale copertura del terreno (si veda Kcb_{full} successivo);

X= parametro che tiene conto dell'evaporazione e quindi della frequenza degli eventi di pioggia (o del suolo bagnato) durante la media stagione: X = 0,05 per eventi infrequenti, X = 0,10 per almeno un evento a settimana.

Supponendo che X valga 0,05 se eventi sono 1 ogni 3 settimane (rapporto R= 0,33), allora X passa da 0,05 a 0,1 passando il rapporto da 0,33 a 1. Di conseguenza X aumenta di 0,05 se R aumenta di 0,67; se ad esempio il rapporto tra n°eventi/n°settimane = 0,72 (come per il 2013) dato che l'aumento effettivo è di 0,72-0,33=0,39, allora facendo la proporzione:

$0,67:0,05=0,39:x$
 $x = 0,029$ circa
 quindi $X = 0,05+0,029 = 0,079$

Kcb mid viene stimato con la seguente equazione:

$K_{cb\ mid} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min})(1 - \exp[-0.7\ LAI])$	equazione 6.7
---	---------------

dove:

Kcb full: coefficiente massimo di traspirazione delle piante (al picco di dimensioni o altezza) per vegetazione avente copertura totale del suolo o $LAI \geq 3$;

Kc min: il coefficiente minimo per suoli nudi ($K_{c\ min} \approx 0,15-0,20$). Nel bacino si potrebbe ipotizzare un valore intermedio di **0,175**;

LAI = leaf area index = area delle foglie/area della superficie del terreno sottostante (m^2/m^2); il rapporto è mediato su un'area grande. L'area delle foglie viene calcolata considerando solo una faccia;

Il LAI per il bosco, in assenza di misure dirette, viene stimato avente valore = 5 (come da lavoro Eccel et al.) e di conseguenza l'equazione 6.6 non si applica per il bosco poiché per $LAI \geq 3$ si ha che $K_{cb\ mid} \approx K_{cb\ full}$.

Il valore di Kcb full è simile alle equazioni per la correzione climatica (6.3) e viene calcolato con la seguente equazione:

$K_{cbfull} = K_{cb,h} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$	equazione 6.8
---	---------------

ove:

U_2 = velocità media del vento, durante la stagione vegetativa (periodo mid), a 2 metri di altezza;

RH_{min} = valore medio dei valori minimi giornalieri di umidità relativa nella stagione vegetativa;

h = altezza media massima delle piante: stimata in 10 metri per il bacino.

$K_{cb,h} = 1+0,1h$ ma comunque $K_{cb,h} \leq 1,2$ se il parametro $h > 2m$; il valore di 1,2 rappresenta il limite superiore per vegetazione alta con copertura piena del terreno e $LAI > 3$ in condizioni sub-umide e con calma di vento. Con $h = 10m$ allora $K_{cb,h} = 1,2$

Per il 2013, ad esempio, $K_{c\ full} (= K_{cb\ mid}) = 1,23$ e $X = 0,079$: di conseguenza $K_{c\ mid} = 1,309$

6.5 – DURATA DELLE FASI FENOLOGICHE E VALORI DEI COEFFICIENTI CULTURALI DELLE COMPONENTI DI USO DEL SUOLO NEI 4 ANNI DI BILANCIO (tabella colori)

La fig. 6.16 riporta visivamente le fasi fenologiche delle componenti di uso del suolo mentre la tabella 6.5 ne riporta le date esatte e i valori dei Kc nei 4 anni di bilancio. I valori sono stati soggetti a correzione climatica. Si nota come il grano invernale è l'unico che ha inizio ciclo nell'anno precedente. In tabella 6.5 sono riportate anche la fonte dei valori Kc (FAO o altro), la regione FAO, la data di semina FAO e quella effettiva per il bacino SMA (una stima); la durata del ciclo vegetativo è semplicemente la somma delle durate delle 4 fasi, per una coltura/componente perenne la durata è 365 giorni (ad esempio menta selvatica, ginestre, alberi...). Per una coltura ci possono essere diversi valori di durata delle fasi fenologiche a seconda della regione FAO di appartenenza (tab. 11, chap. 6, quaderno FAO 56), per le colture del bacino si è cercata la regione FAO più adeguata ed eventualmente corretta per adeguarla alle condizioni del bacino; per le componenti non previste dal quaderno FAO (ginestre, arbusti/piccoli alberi ecc.) si sono trovate altre fonti od osservazioni di campagna, come in precedenza visto nel dettaglio delle componenti (ad esempio Eccel 2007).

Il Kc mid del girasole è di 1,05 poiché in tab. FAO è variabile tra 1,00 e 1,15 con la nota che 1,00 è per girasole non irrigato con popolazione meno densa; il valore di 1,05 è apparso adeguato.

Alle aree impermeabili è stato assegnato Kc = 0.

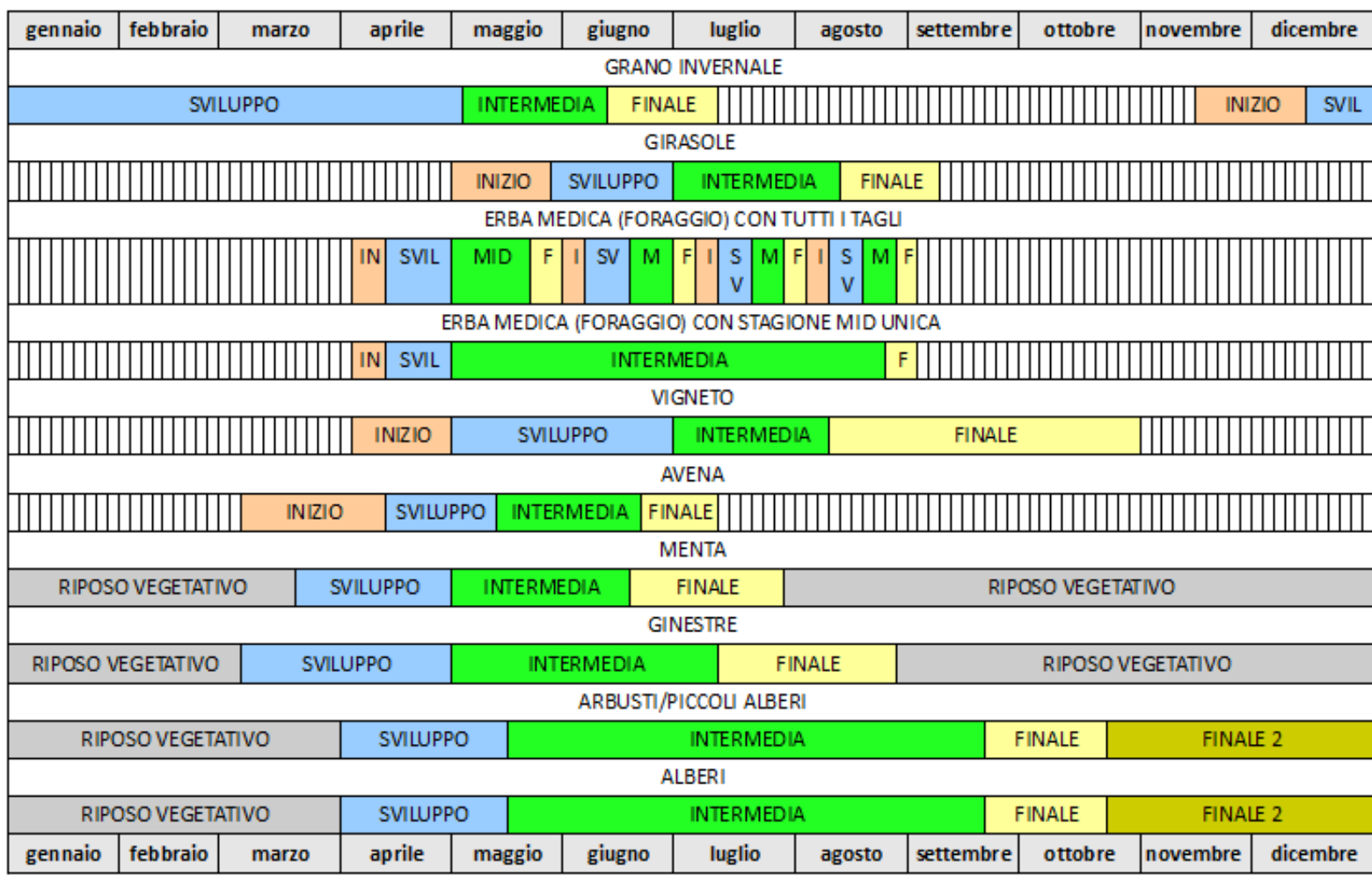


FIG. 6.16 – fasi fenologiche delle componenti di uso del suolo. Ove non c'è colore il terreno è scoperto (tranne un breve periodo dopo la raccolta). Occorre però considerare quale coltura verrà messa a dimora l'anno successivo: se dal girasole si passa a grano, da novembre inizia la fase iniziale del grano e non c'è terreno scoperto. Per gli impianti di erba medica, che durano 4-5 anni, c'è il riposo vegetativo dopo l'ultimo taglio e fino al successivo dell'anno seguente; se l'impianto è al primo o all'ultimo anno il riposo vegetativo non c'è rispettivamente all'inizio e alla fine dell'anno

COLTURE/FASI	iniziale	sviluppo	maturità (mid)	finale	regione FAO	data semina FAO/effettiva	durata del ciclo di vita
grano invernale	30 15nov-14dic	140 15dic-03mag	40 04mag-12giu	30 13giu-12lug	Mediterranean	novembre 15-nov	240
Kc	0,7	proporzionale	1,15	0,25			
Kc corretto 2013	/	/	1,15	no correzione		fasi fenologiche valori Kc	fonte dei dati
Kc corretto 2014	/	/	1,18	no correzione			quad. FAO 56
Kc corretto 2015	/	/	1,16	no correzione			quad. FAO 56
Kc corretto 2016	/	/	/	no correzione			
girasole	25 01mag-25mag	35 26mag-29giu	45 30giu-13ago	25 14ago-07sett	Medit./Calif.	aprile/maggio 01-mag	130
Kc	0,35		1,05	0,35			
Kc corretto 2013	/	/	1,07	no correzione		fasi fenologiche valori Kc	fonte dei dati
Kc corretto 2014	/	/	1,05	no correzione			quad. FAO 56
Kc corretto 2015	/	/	1,08	no correzione			quad. FAO 56
Kc corretto 2016	/	/	1,06	no correzione			
vigneto	30 01apr-30apr	60 01mag-29giu	40 30giu-08ago	80 09ago-27ott	Mid latitudes (wine)	aprile pluriennale	210
Kc	0,3	proporzionale	0,7	0,45			
Kc corretto 2013	/	/	0,72	0,47		fasi fenologiche valori Kc	fonte dei dati
Kc corretto 2014	/	/	0,70	0,45			quad. FAO 56
Kc corretto 2015	/	/	0,72	0,47			quad. FAO 56
Kc corretto 2016	/	/	0,71	0,46			

Tab. 6.5 prima parte – durata delle fasi fenologiche e valori dei Kc tabellati (corretti per il clima) delle componenti di uso del suolo. Sono indicati anche la regione FAO di appartenenza, la data di semina FAO e quella effettiva, le fonti dei dati.

/ = il valore resta come quello di riferimento

no correzione = valore della fase finale che è <0,45 e quindi non va corretto

fase finale 2 = secondo calo del Kc, caratteristico degli arbusti/piccoli alberi e alberi

COLTURE/FASI	iniziale	sviluppo	maturità (mid)	finale	regione FAO	data semina FAO/effettiva	durata del ciclo di vita
	10	20	115	5	California (USA)	Jan-Apr(last-4°C) - 1st cutting	150
erba medica	01apr-10apr	11apr-30apr	01mag-23ago	24ago-28ago	Riposo veg.	pluriennale	
Kc	0,4	proporzionale	0,95	0,90	0,4		
Kc corretto 2013	/	/	0,96	0,91		fasi fenologiche valori Kc	fonte dei dati
Kc corretto 2014	/	/	0,95	0,9			quad. FAO 56
Kc corretto 2015	/	/	0,96	0,91			quad. FAO 56
Kc corretto 2016	/	/	0,96	0,91			
	40	30	40	20			
avena	05march-13apr	14apr-13mag	14mag-22giu	23giu-12lug	non indicato	non indicata	
Kc	0,3	proporzionale	1,15	0,25		05 marzo (spontanea)	
Kc corretto 2013	/	/	1,18	no correzione		fasi fenologiche valori Kc	fonte dei dati
Kc corretto 2014	/	/	1,17	no correzione			osserv. campagna
Kc corretto 2015	/	/	1,16	no correzione			quad. FAO 56
Kc corretto 2016	/	/	1,15	no correzione			
	80	40	50	40	155	non indicata	365
menta	01jan-21mar	22mar-30apr	01mag-19giu	20giu-29lug	30lug-31dic	pluriennale (spontanea)	
Kc	0,6	proporzionale	1,15	0,60	0,60		
Kc corretto 2013	/	/	1,15	0,60	0,60	fasi fenologiche valori Kc	fonte dei dati
Kc corretto 2014	/	/	1,16	0,61	0,61		osserv. campagna
Kc corretto 2015	/	/	1,15	0,60	0,60		quad. FAO 56
Kc corretto 2016	/	/	1,16	0,61	0,60		

Tab. 6.5 seconda parte – durata delle fasi fenologiche e valori dei Kc tabellati (corretti per il clima) delle componenti di uso del suolo. Sono indicati anche la regione FAO di appartenenza, la data di semina FAO e quella effettiva, le fonti dei dati. Per l'erba medica si può mettere un valore anche per la fase invernale, di 0,4. Si veda la spiegazione anche della didascalia di tab. 6.5 -prima parte e la sez. 6.4.2

/ = il valore resta come quello di riferimento

no correzione = valore della fase finale che è <0,45 e quindi non va corretto

fase finale 2 = secondo calo del Kc, caratteristico degli arbusti/piccoli alberi e alberi

COLTURE/FASI	iniziale	sviluppo	maturità (mid)	finale	altra fase	data semina FAO/effettiva	durata del ciclo di vita
ginestre	75 01jan-16mar	45 17mar-30apr	75 01mag-14lug	45 15lug-28ago	125 29ago-31dic	non indicata pluriennale	365
Kc	0,15	proporzionale	0,30	0,15	0,15		
Kc corretto 2013	/	/	0,30	no correzione	/	fasi fenologiche valori Kc	fonte dei dati
Kc corretto 2014	/	/	0,31	no correzione	/		osserv. campagna
Kc corretto 2015	/	/	0,31	no correzione	/		WUCOLS III
Kc corretto 2016	/	/	0,31	no correzione	California (WUCOLS)		
piccol alberi/arbusti	90 01jan-31mar	45 01apr-15mag	130 16mag-22sett	30 23sett-22ott	70 23ott-31dic	non indicata marzo	365
Kc	0,50	proporzionale	0,90	0,65	0,5		
Kc corretto 2013	/	/	0,92	0,67	/	fasi fenologiche valori Kc	fonte dei dati
Kc corretto 2014	/	/	0,89	0,64	/		Eccel 2007
Kc corretto 2015	/	/	0,92	0,67	/		quad. FAO 56
Kc corretto 2016	/	/	0,91	0,66	/		
alberi	90 01jan-31mar	45 01apr-15mag	130 16mag-22sett	40 23sett-01nov	60 02nov-31dic		365
Kc	0,5	proporzionale	1,2+(da 0,05 a 0,1)	0,65	0,5		
Kc corretto 2013	/	/	1,23+0,079	0,68	/	fasi fenologiche valori Kc	fonte dei dati
Kc corretto 2014	/	/	1,19+0,100	0,64	fase end 2		Eccel 2007
Kc corretto 2015	/	/	1,23+0,075	0,68	/		quad. FAO 56
Kc corretto 2016	/	/	1,22+0,088	0,67	/		equaz. Kcmid
Aree impermeabili: Kc = 0							

Tab. 6.5 terza parte – durata delle fasi fenologiche e valori dei Kc tabellati (corretti per il clima) delle componenti di uso del suolo. Sono indicati anche la regione FAO di appartenenza, la data di semina FAO e quella effettiva, le fonti dei dati.

/ = il valore resta come quello di riferimento

no correzione = valore della fase finale che è <0,45 e quindi non va corretto

fase finale 2 = secondo calo del Kc, caratteristico degli arbusti/piccoli alberi e alberi

6.6 – METODOLOGIA: ESEMPIO DI CALCOLO DI COEFFICIENTE UNICO DI BACINO (Kc BAC) A PARTIRE DAI COEFFICIENTI DELLE COMPONENTI E DELLE CLASSI DI USO DEL SUOLO

Il metodo per calcolare il Kc unico a livello di bacino (Kc bac) a partire dai Kc delle classi di uso del suolo non è difficile ma laborioso, per questo si è creato un esempio con classi e componenti ipotetiche per spiegare il processo. Si supponga di avere un bacino di 1000 ettari di cui si vuole calcolare il Kc; per comodità si voglia calcolarlo a scala temporale mensile (invece nel vero lavoro è stato calcolato a scala giornaliera). Nel bacino sono presenti quattro classi di uso del suolo, con le seguenti aree:

classe	Area (ha)	Peso (= area classe/area tot)
1	200	0,2
2	300	0,3
3	150	0,15
4	350	0,35

Tab. 6.6 – classi dell'uso del suolo e aree/pesi – esempio

Le classi sono formate dalle componenti di tab. 6.7 (realizzata come la tab. 6.3). Si vede come la 1 e la 2 sono classi uniche (come lo sono il seminativo a grano, il seminativo a girasole...) mentre la 3 e la 4 sono classi miste (come lo sono gli incolti, i boschi radi...)

CLASSI DI USO DEL SUOLO	COMPONENTI DELLE CLASSI DI USO DEL SUOLO	% CON CUI LE COMPONENTI FORMANO LE CLASSI
1	A	100%
2	B	100%
3	C	60%
	F	40%
4	C	25%
	D	15%
	E	50%
	F	10%

Tab. 6.7 – classi di uso del suolo e componenti delle classi - esempio

La tab. 6.8 riporta i Kc tabellati nonché il KcTN, mese per mese.

mese	Kc tabellati componenti (sia delle classi uniche che miste)						
	KcTN	A	B	C	D	E	F
gennaio	1,05		0,3		0,2	0,4	
febbraio	1,15		0,4		0,4	0,4	
marzo	1,01	0,3	0,5		0,8	0,6	0,4
aprile	0,72	0,7	0,6	0,2	1	0,8	0,8
maggio	0,9	1,1	0,7	0,7	1,1	1	1,2
giugno	0,45	1	0,9	1,2	1,1	1	1,1
luglio	0,15	0,6	0,9	1,1	0,7	0,9	1
agosto	0,2	0,2	0,7	0,7	0,3	0,8	0,9

settembre	0,35		0,5		0,1	0,7	0,5
ottobre	0,85					0,6	0,1
novembre	1,1					0,5	
dicembre	0,95					0,4	

Tab. 6.8 – valori dei Kc tabellati delle componenti di uso del suolo e valori del KcTN - esempio

Con la seguente tabella si calcolano i Kc effettivi per le classi uniche: si riprendono i Kc tab delle componenti A e B della tab. 6.8 e li si confronta con il KcTN, il maggiore dei due è il Kc effettivo per la classe.

mese	calcolo Kc effettivi "classi uniche"				
	KcTN	Kc tab componenti		Kc effett classi uniche	
		A	B	classe 1	classe 2
gennaio	1,05		0,3	1,05	1,05
febbraio	1,15		0,4	1,15	1,15
marzo	1,01	0,3	0,5	1,01	1,01
aprile	0,72	0,7	0,6	0,72	0,72
maggio	0,9	1,1	0,7	1,1	0,9
giugno	0,45	1	0,9	1	0,9
luglio	0,15	0,6	0,9	0,6	0,9
agosto	0,2	0,2	0,7	0,2	0,7
settembre	0,35		0,5	0,35	0,5
ottobre	0,85			0,85	0,85
novembre	1,1			1,1	1,1
dicembre	0,95			0,95	0,95

Tab. 6.9 – calcolo dei valori dei Kc effettivi delle classi uniche - esempio

Con la tab. 6.10 si calcolano prima i Kc tabellati per le classi miste 3 e 4, riprendendo dalla tab. 6.8 i Kc tabellati delle componenti C, D, E, F e facendo una media pesata (secondo i pesi della 3° colonna di tab. 6.7). Poi, come in precedenza per le classi uniche, si fa il confronto tra Kc tabellato della classe e il KcTN: il maggiore dei due è il Kc effettivo.

mese	calcolo Kc effettivi "classi miste"								
	Kc tabellati componenti				Kc tab "classi miste"		KcTN	Kc eff "classi miste"	
	C	D	E	F	classe 3	classe 4		classe 3	classe 4
gennaio		0,2	0,4		0,00	0,23	1,05	1,05	1,05
febbraio		0,4	0,4		0,00	0,26	1,15	1,15	1,15
marzo		0,8	0,6	0,4	0,16	0,46	1,01	1,01	1,01
aprile	0,2	1	0,8	0,8	0,44	0,68	0,72	0,72	0,72
maggio	0,7	1,1	1	1,2	0,90	0,96	0,9	0,9	0,96
giugno	1,2	1,1	1	1,1	1,16	1,08	0,45	1,16	1,08
luglio	1,1	0,7	0,9	1	1,06	0,93	0,15	1,06	0,93
agosto	0,7	0,3	0,8	0,9	0,78	0,71	0,2	0,78	0,71
settembre		0,1	0,7	0,5	0,20	0,42	0,35	0,35	0,42

ottobre			0,6	0,1	0,04	0,31	0,85	0,85	0,85
novembre			0,5		0,00	0,25	1,1	1,1	1,10
dicembre			0,4		0,00	0,20	0,95	0,95	0,95

Tab. 6.10 – calcolo dei valori dei Kc effettivi delle classi miste - esempio

Infine si riprendono tutti i Kc effettivi delle quattro classi e si fa una media pesata dei valori mensili (secondo i pesi di tab. 6.6): in tal modo si trova il valore mensile del Kc a livello di bacino (Kc bac).

mese	Kc effettivo "classi uniche"		Kc effettivo "classi miste"		Kc bacino
	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	
gennaio	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
febbraio	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
marzo	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
aprile	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
maggio	1,1	0,9	0,9	0,96	0,96
giugno	1	0,9	1,16	1,075	1,02
luglio	0,6	0,9	1,06	0,93	0,87
agosto	0,2	0,7	0,78	0,71	0,62
settembre	0,35	0,5	0,35	0,415	0,42
ottobre	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
novembre	1,1	1,1	1,1	1,1	1,10
dicembre	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95

Tab. 6.11 – calcolo del valore dei Kc unico di bacino (Kc bac) - esempio

6.7 – GRAFICI: ANDAMENTO ANNUALE DEI Kc DELLE CLASSI DI USO DEL SUOLO E DEL Kc BACINO

Di seguito si riportano gli andamenti giornalieri dei Kc di alcune delle singole classi di uso suolo e gli andamenti mensili del Kc bacino.

6.7.1 – Andamento giornaliero dei Kc delle singole classi di uso del suolo

Il grafico di fig. 6.17 riporta i valori di Kc tabellato per il grano invernale e il KcTN, anno 2015. Il maggiore dei due diviene Kc effettivo (fig. 6.18). Si nota come il KcTN, calcolato su scala bi-settimanale, abbia parecchie fluttuazioni in base alla frequenza di pioggia di quei 14 giorni. Comunque sono evidenti il calo estivo e i picchi primaverili e autunnali, pur con valori molto bassi in dicembre e gennaio. Il trend è simile in tutti gli anni ma variabile in valori assoluti e distribuzione valori. Per il grano è evidente la salita del Kc in inverno e il massimo Kc della fase mid, a cui segue un calo fino alla mietitura di metà luglio. I valori di Kc mid ed end hanno avuto correzione climatica.

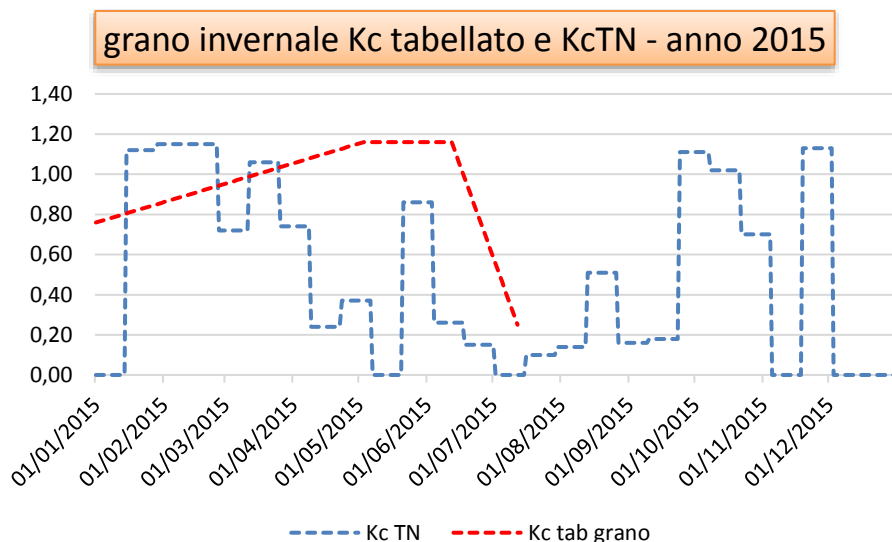


Fig. 6.17 – andamento del KcTN (bi-settimanale) e del Kc tabellato del grano invernale

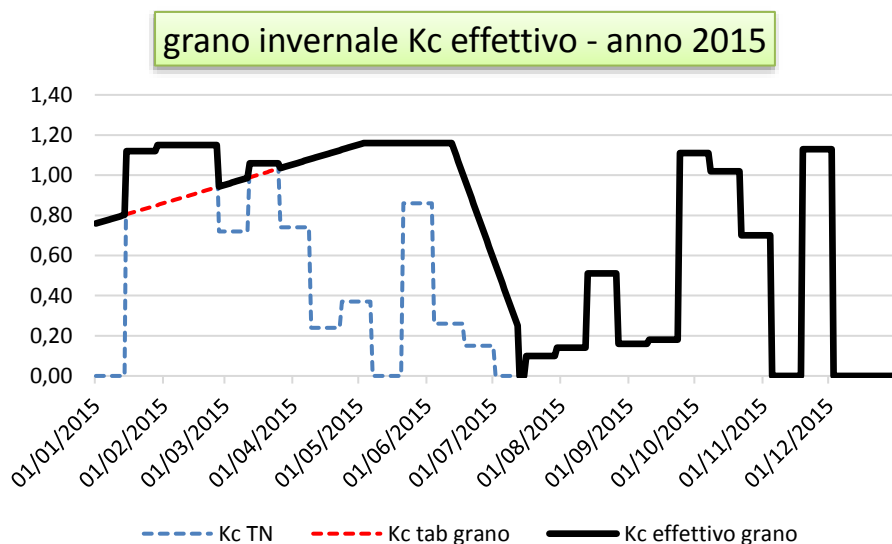


Fig. 6.18 – andamento del Kc effettivo del grano invernale (è il maggiore tra KcTN e Kc tab)

I grafici di fig. 6.18 e 6.19 sono analoghi ai precedenti ma riportano i Kc dell'erba medica. L'erba medica, a differenza del grano, se l'impianto è pluriennale è presente nel suolo anche nei mesi di dormienza. Il principio di calcolo del Kc effettivo è lo stesso. Si ricorda che per l'erba medica si è utilizzato un Kc unico che media tra tutti i tagli della stagione. Il brusco picco del Kc tab dell'erba medica è dovuto proprio all'ultimo taglio di fine agosto.

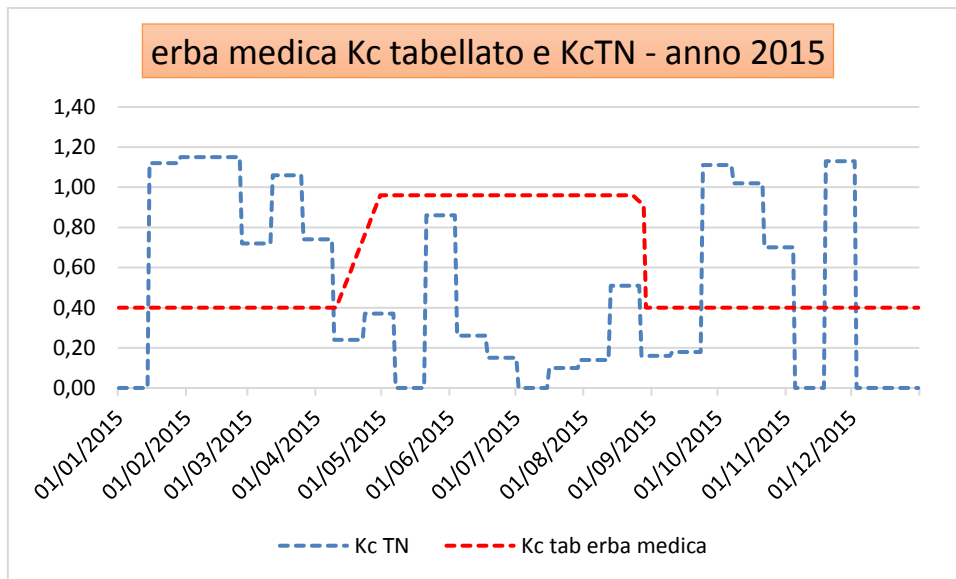


Fig. 6.19 – andamento del KcTN (bi-settimanale) e del Kc tabellato dell'erba medica

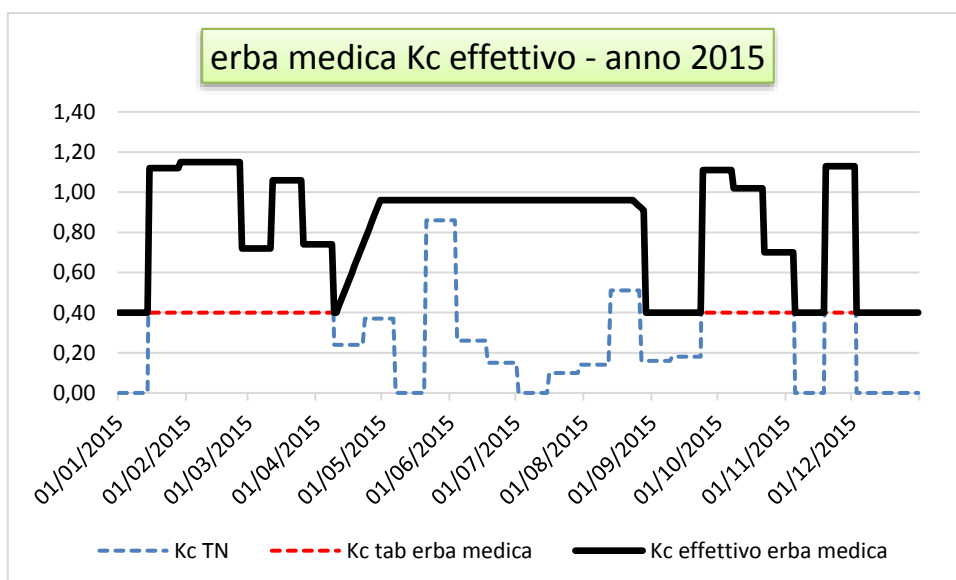


Fig. 6.20 – andamento del Kc effettivo dell'erba medica (è il maggiore tra KcTN e Kc tab)

Il grafico di fig. 6.21 riporta il trend del Kc tabellato del bosco. La stagione intermedia è molto lunga e il Kc mid del bosco, dopo anche la correzione climatica, è il più alto di tutte le classi di uso del suolo e contribuisce molto a tenere alto il Kc bacino anche in virtù dell'estesa superficie coperta da boschi. Il grafico di fig. 6.22 riporta il Kc effettivo del bosco.

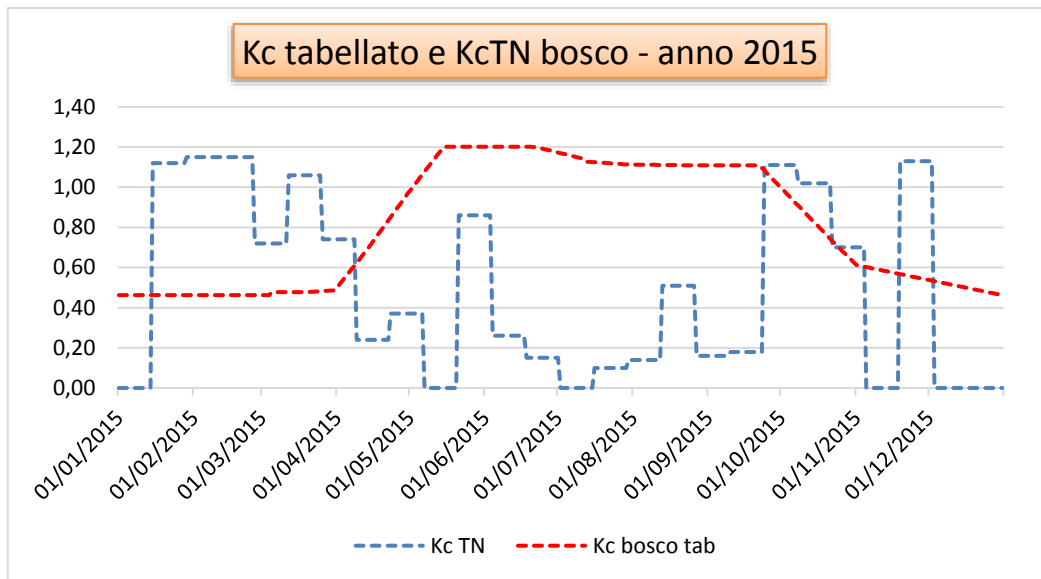


Fig. 6.21 – andamento del KcTN (bi-settimanale) e del Kc tabellato del bosco

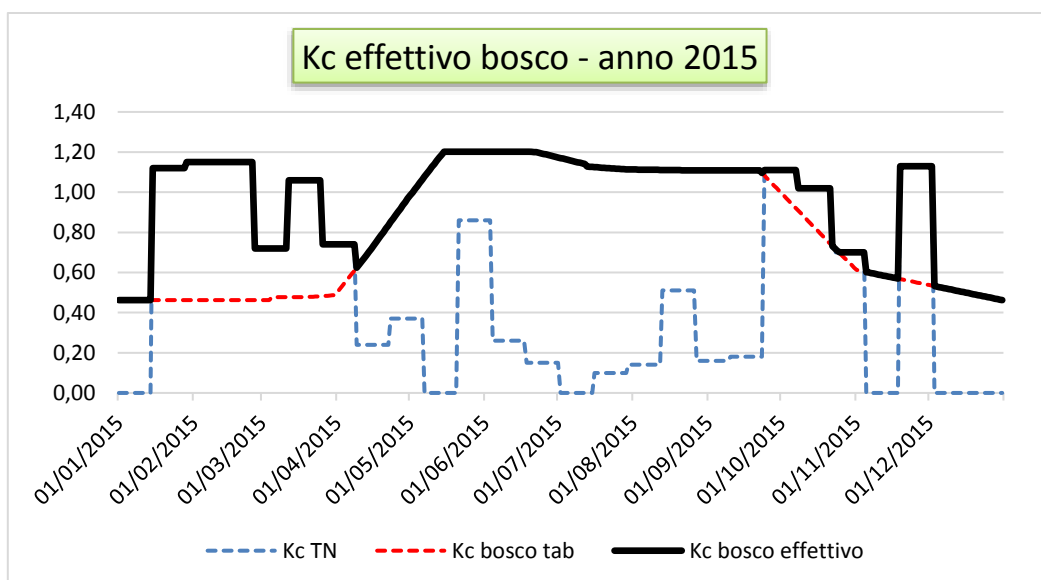


Fig. 6.22 – andamento del Kc effettivo del bosco (è il maggiore tra KcTN e Kc tab)

Infine il grafico di figura 6.23 riporta solamente i Kc tabellati delle classi di uso del suolo che rappresentano gli usi del suolo “misti” ad esclusione delle “aree presso edificato”. Queste zone sono state parzialmente abbandonate dall’agricoltura (terreni a riposo) o totalmente abbandonati (incolti, parte dei boschi radi, parte dei boschi). **La sequenza terreno a riposo-incolto-bosco rado-bosco rappresenta una scaletta a naturalizzazione crescente ovvero una scala inversa di abbandono agricolo.** Si ricorda però che parte dei boschi e boschi radi non sono ex coltivi ma sono sempre stati così. Ciò che fa la differenza tra le classi è la diversa % di erba, ginestre, arbusti/piccoli alberi e alberi (si veda la tab. 6.3 per le %): i boschi, essendo composti da ben il 75% di alberi, hanno un Kc molto più elevato e che si mantiene tale a lungo. Le altre classi hanno un comportamento a scalare, fino a giungere ai terreni a riposo che hanno erbe con un picco di Kc alto ma breve allorché

sono in fioritura avena e menta selvatica: il picco tuttavia dura poco. I Kc tabellati sono utili in quanto, pur prevedendo una quota di evaporazione, considerano soprattutto la traspirazione e descrivono molto bene le fasi fenologiche delle classi di uso del suolo.

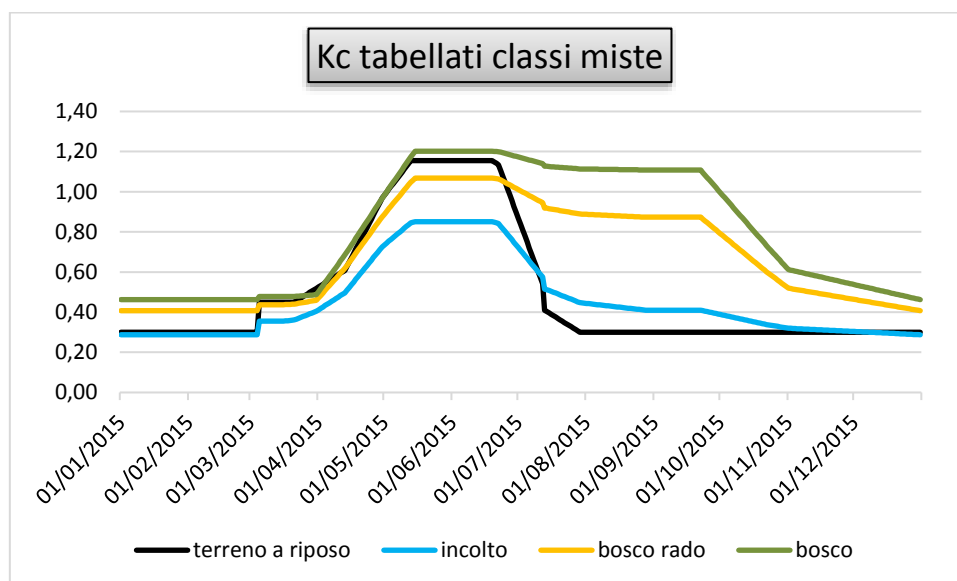


Fig. 6.23 – andamento annuale dei Kc tabellati delle classi miste (ad eccezione delle “aree presso edificato”)

6.7.2 – Andamento mensile del Kc bacino nei 4 anni di bilancio

Il Kc bacino descrive quanto la richiesta evapotraspirativa massima dell'intero bacino (e non di una singola coltura o componente o classe) differisce da quella di riferimento ET0a. Di seguito si riportano i grafici dell'andamento mensile del Kc bacino nei 4 anni di applicazione del modello: si è scelto di rappresentare in scala mensile per maggiore chiarezza ma il Kc bacino, come tutti quelli delle classi di uso suolo, è stato calcolato a scala giornaliera.

Il Kc BACINO eff è il valore che si voleva determinare ed è frutto della media pesata dei Kc effettivi di tutte le classi di uso del suolo, a loro volta ottenuti da interpolazione tra i loro Kc tabellati e il Kc da terreno nudo (KcTN). Il Kc bacino tab è invece la media pesata dei Kc tab di tutte le classi di uso del suolo (in questo caso il KcTN non entra): pur considerando in minima parte l'evaporazione, il Kc bacino tabellato è indice soprattutto del fabbisogno traspirativo delle classi di uso del suolo (o delle loro componenti). È riportato anche il valore costante di 1 del Kc di riferimento (il consueto prato di erba/festuca alto 12 cm mantenuto in condizioni idriche ottimali).

I grafici dei vari anni presentano in linea generale sempre lo stesso andamento dei parametri poiché questo andamento è frutto delle caratteristiche climatiche generali del territorio nonché dell'uso del suolo che si cambia di anno in anno (soprattutto la conduzione dei seminativi) ma resta abbastanza stabile. Ovviamente le differenze dei parametri climatici e dell'uso del suolo fa sì che ciò che vari sia il valore assoluto dei valori e la distribuzione nell'arco dell'anno dei valori stessi.

Il Kc bacino (effettivo) presenta tre picchi: due in corrispondenza della massima evaporazione dei suoli (per abbondanza di acqua nei suoli), quando piove molto e il KcTN è alto, e uno in corrispondenza della massima traspirazione dalle colture/altre erbe-piante (arbusti, ginestre ecc.). Si vede come il KcTN “trascini” verso l’alto il Kc bacino effettivo che altrimenti sarebbe più basso nei mesi di maggiore evaporazione. Occorre dire che nei mesi tardo-invernali o di inizio primavera nonché nei mesi autunnali le temperature non sono alte ma per il modello che calcola il KcTN questo è tenuto in conto mediante la ET0a del periodo in cui sono calcolati i valori stessi del KcTN; poi per il modello conta molto la quantità di acqua piovuta.

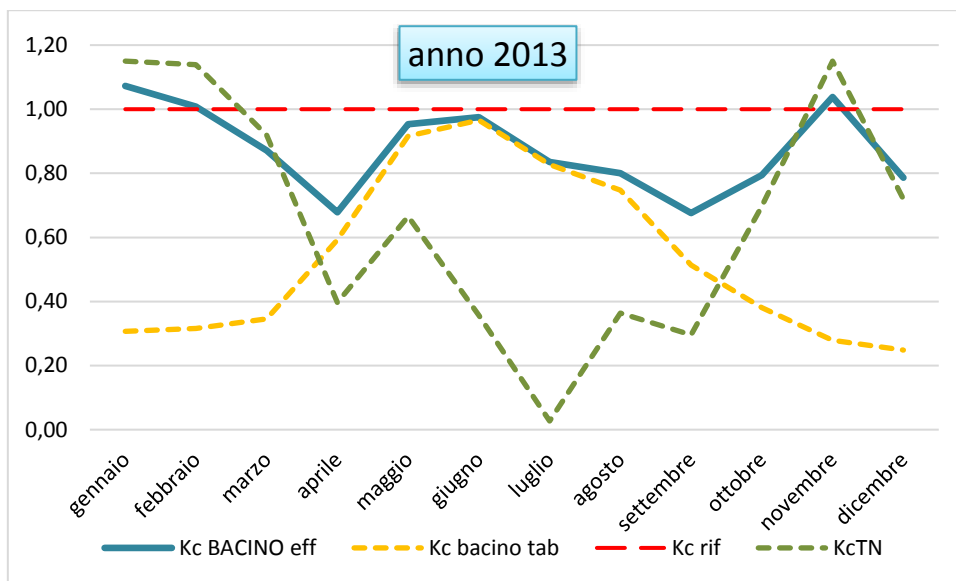


Fig. 6.24 – andamento mensile del Kc bacino effettivo per l’anno 2013. Sono riportati anche il Kc bacino tabellato, il Kc di riferimento (prato di erba) e il KcTN

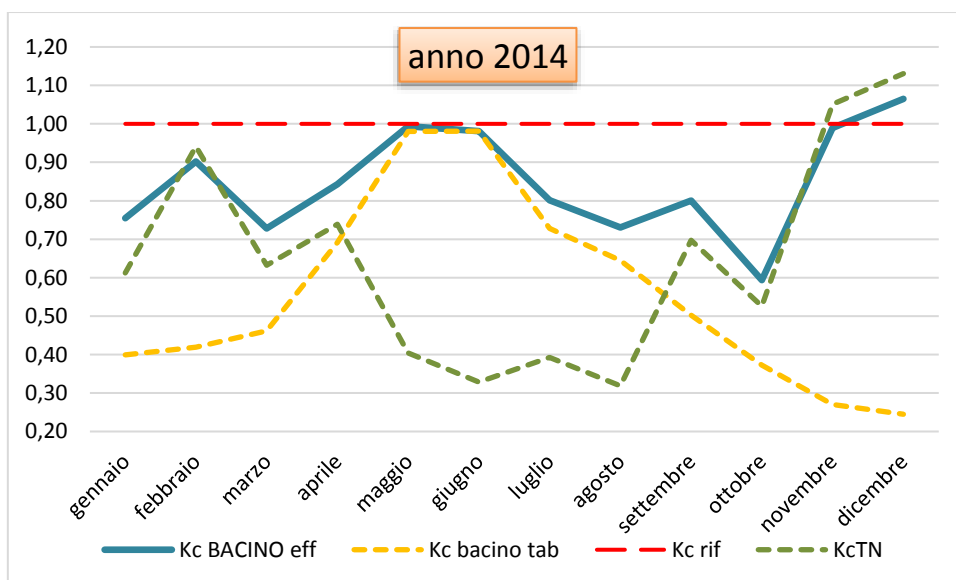


Fig. 6.25 – andamento mensile del Kc bacino effettivo per l’anno 2014. Sono riportati anche il Kc bacino tabellato, il Kc di riferimento (prato di erba) e il KcTN

Tra le classi che portano a valori più elevati il Kc bacino nei mesi estivi ci sono, come visto in fig. 6.23, le classi che hanno una maggiore % di alberi (boschi, boschi radi...) ma ci sono anche seminativi che hanno un picco breve ma elevato nei mesi di maggio-giugno (grano, girasole).

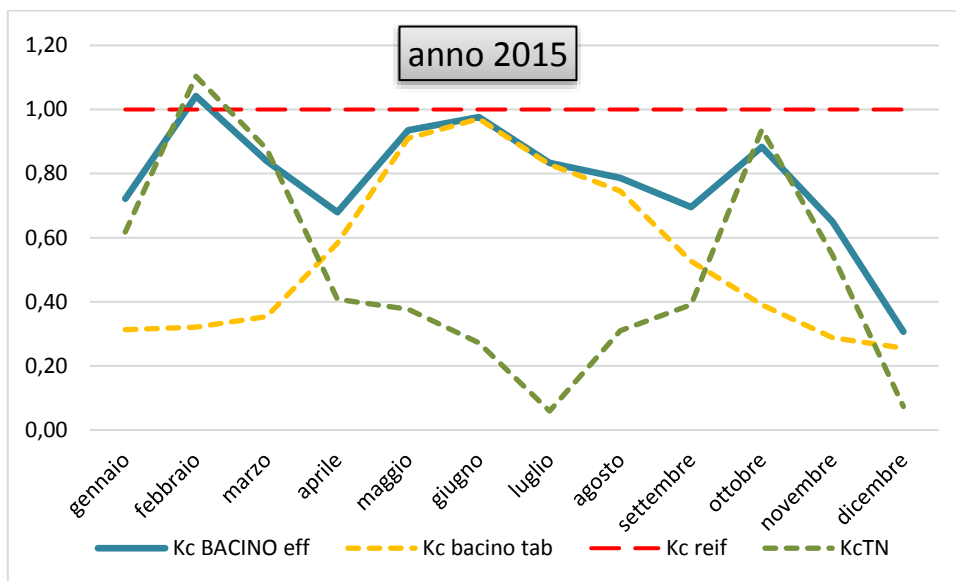


Fig. 6.26 – andamento mensile del Kc bacino effettivo per l'anno 2015. Sono riportati anche il Kc bacino tabellato, il Kc di riferimento (prato di erba) e il KcTN

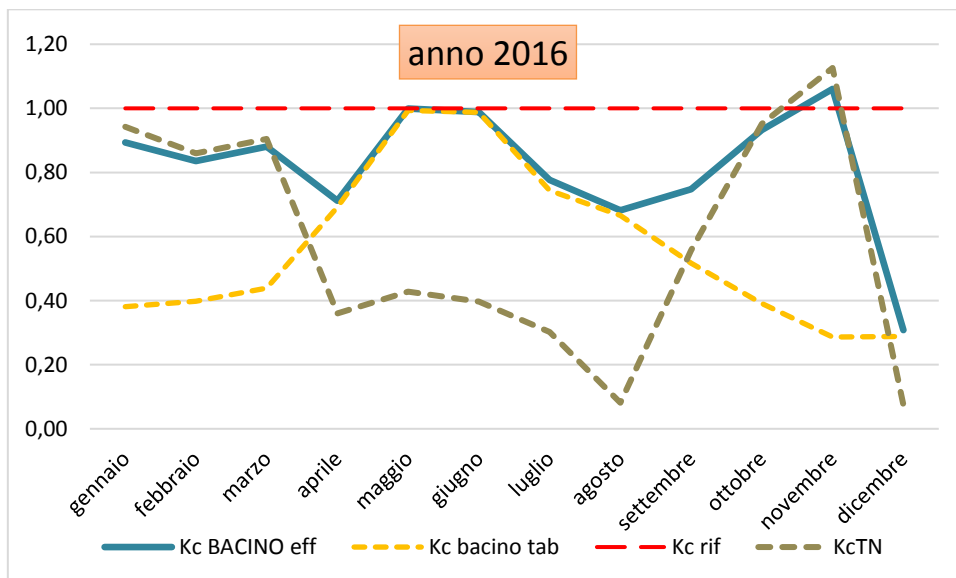


Fig. 6.27 – andamento mensile del Kc bacino effettivo per l'anno 2016. Sono riportati anche il Kc bacino tabellato, il Kc di riferimento (prato di erba) e il KcTN

7.1– IL METODO DEL CURVE NUMBER “TRADIZIONALE”

Quando vi è una precipitazione di forte intensità, anche se i suoli sono asciutti, l’acqua defluisce in superficie in maniera tanto maggiore quanto maggiore è la pendenza del terreno (fig. 7.1) e quanto più scoperto è il terreno. A parità di pendenza se il terreno è appena stato arato vi è grande infiltrazione poiché le zolle sono grandi, ma se è appena stato seminato (e rullato) una forte precipitazione provoca un forte ruscellamento e molto terreno viene portato via (erosione). Se è inerbito o ci sono alberi il ruscellamento è molto inferiore. A parità di pendenza e copertura del suolo, ovviamente se i terreni sono umidi basta una pioggia di una certa intensità per avere ruscellamento mentre se sono asciutti la stessa pioggia può non produrre ruscellamento.

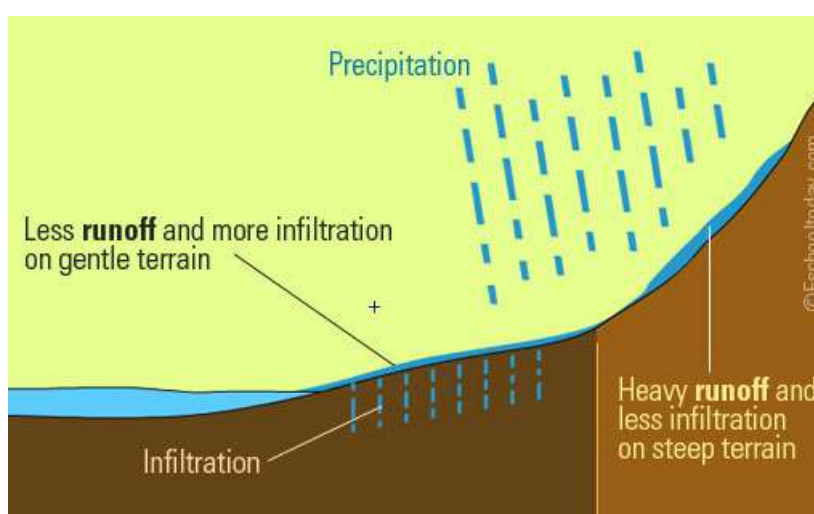


Fig. 7.1 – tasso di ruscellamento su terreni a diversa pendenza

Da qui in avanti chiameremo il ruscellamento con l’acronimo inglese, RO (runoff). Per comprendere quanta dell’acqua di precipitazione va in RO viene ampiamente utilizzato il metodo curve number del USDA (1972). Tale metodo è poi andato incontro negli anni a successivi adattamenti ma la struttura è la stessa. Ad ogni territorio viene assegnato un numero, chiamato curve number (CN) proprio perché ad ogni numero corrisponde curva a cui è assegnata una diversa % di RO, a parità di precipitazione (fig. 7.2). A valori maggiori di CN corrispondono valori di RO più elevati. Il CN varia da 0 a 100.

Il valore di CN di un bacino è funzione di:

- uso del suolo (comprese le gestioni e le condizioni idrologiche)
- permeabilità dei suoli
- pendenza del bacino
- AMC (antecedent soil moisture conditions)

Quando piove l’acqua viene inizialmente trattenuta dall’intercettazione delle foglie, dalle depressioni del terreno e dall’infiltrazione: questo accumulo si chiama “initial abstraction” (Ia) e il RO inizia solo dopo che la quota di Ia è stata saturata.

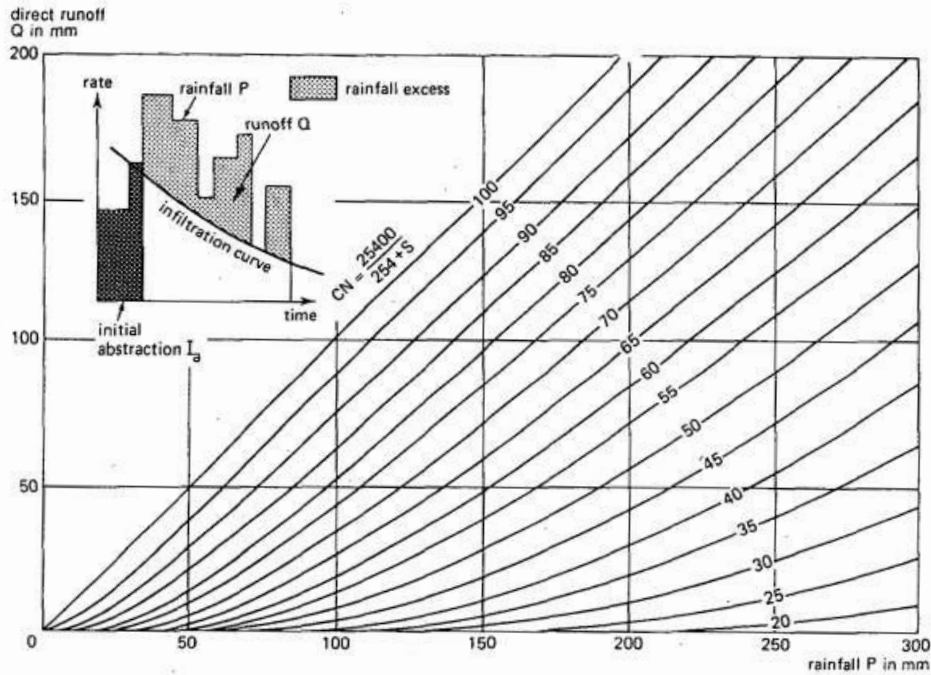


Fig. 7.2 – grafico che riporta curve per valori di CN da 20 a 100 (passo 10). In ascissa la precipitazione (mm), in ordinata il ruscellamento (mm)

Ogni territorio (o meglio il suolo “caratteristico” del territorio) ha un valore massimo di immagazzinamento di acqua che corrisponde alla *potential maximum retention* (S) (praticamente è una stima della riserva idrica del suolo). Tale parametro è legato al CN secondo le due seguenti equazioni:

$CN = 25400 / (254 + S)$	equazione 7.1
--------------------------	---------------

$S = (25400 / CN) - 254$	equazione 7.2
--------------------------	---------------

Se la precipitazione Pa è espressa in inches la formula 7.2 diviene:

$S = (1000 / CN) - 10$	equazione 7.3
------------------------	---------------

Per trasformare il valore di S (eq.7.3) in mm occorre moltiplicare per 25,4.

La quota di acqua che deve fornire la pioggia affinché si saturi l’initial abstraction è pari a:

$I_a = 0,2 * S$	equazione 7.4
-----------------	---------------

Il valore di 0,2 può variare a seconda del sito e di altri parametri ma è considerato essere attendibile in molti casi.

Per una data pioggia la quota di acqua che va in RO è la seguente:

$Q = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S}$	equazione 7.5
-------------------------------	---------------

ove Q = acqua di ruscellamento

Perché avvenga RO occorre che si sia saturato $Ia = 0,2 * S$, altrimenti $Q = 0$.

Il parametro S ha valore costante e c'è il pericolo che, se i suoli sono a differente grado di umidità, la quota di ruscellamento sia comunque la stessa a parità di precipitazione. Allora è stato introdotto un parametro, **AMC** (*antecedent soil moisture condition*), che indica quanto è piovuto nei 5 giorni precedenti il giorno della cui precipitazione si vuole calcolare il RO; allora se è piovuto sotto una certa soglia i suoli sono abbastanza asciutti ed è più difficile avere RO, viceversa se è piovuto sopra una certa soglia, infine c'è la situazione intermedia. La tabella 7.1 riporta i valori soglia e gli AMC e CN assegnati; si nota come ci sono ora 3 tipi di CN, uno per ogni AMC. Per chiarezza si sono riportati i veri valori di CN I, II e III del bacino SMa del 2015. Sono valori che tutti gli anni cambiano poiché varia l'uso del suolo; inoltre sono valori corretti per la pendenza media del bacino e quindi hanno il simbolo (s) accanto.

AMC	Dormancy	Growing	Average	CN(s) assegnato (valore SMa 2013)
I	<13	<36	<23	CN I(s) (60,1)
II	13-28	36-53	23-40	CN II(s) (77,7)
III	>28	>53	>40	CN III(s) (90,3)

Tab. 7.1 - intervalli della AMC e corrispondenti tipologie di CN(s), con anche i valori per il SMa 2015
Il valore di CN II per il SMa 2015 è 73,9 (non corretto per la pendenza media del bacino)

in cui:

dormancy = stagione di riposo vegetativo

growing = stagione di sviluppo vegetativo

average = stagione intermedia

Si sono lasciati i termini inglesi per non fare confusione con le fasi fenologiche. Possono essere chiamate "classi stagionali".

Si vede come ad AMC minore (suoli + asciutti) corrisponde un valore di CN inferiore: di conseguenza il parametro S è maggiore ed anche Ia: occorre più acqua per avere ruscellamento.

Dalla tabella si nota anche che a parità di AMC (ovvero di quanto è piovuto i 5 giorni precedenti) nella stagione di riposo vegetativo occorre meno acqua per avere ruscellamento: questo perché la richiesta evapotraspirativa è inferiore, i suoli sono più umidi e c'è più acqua disponibile per il RO. Viceversa per la stagione *growing*, e una via intermedia per la stagione *average*.

7.2– IL METODO DEL CURVE NUMBER “IN CONTINUO”: APPLICAZIONE AL CASO DI STUDIO

7.2.1 – limiti AMC su basi fenologiche

Il primo passo per applicare il CN al caso di studio è trovare valori limite degli AMC per ogni mese dell'anno; infatti è apparso ragionevole cercare di dettagliare la tabella 7.1 stante gli studi di carattere fenologico che sono stati fatti per la stima dei coefficienti colturali. La tabella 7.2 riporta le fasi fenologiche delle componenti di uso del suolo per ogni mese; ovviamente alcuni mesi sono divisi in due fasi fenologiche.

Dato che, per una data AMC, il limite varia in funzione della richiesta evapotraspirativa, si è seguito il seguente criterio: si è posta come *dormancy* tutta la stagione invernale (dicembre, gennaio, febbraio), e come *dormancy/average* (e *average/dormancy*) marzo e novembre, che sono i periodi di transizione. Negli altri mesi dell'anno si è seguita la fase fenologica in senso più stretto oppure il criterio assegnato al terreno nudo (che può essere presente in più mesi). Le corrispondenze con le fasi fenologiche e con il terreno nudo per i mesi da aprile a ottobre sono le seguenti:

nudo = *average* in aprile, maggio, settembre, ottobre

nudo = *growing* in estate (giugno, luglio, agosto)

iniziale = come terreno nudo

sviluppo = *average*

intermedia = *growing*

end = *average*

impermeabile: il limite è stato posto per convenzione a 1/10 del valore *average* (molto basso, per non assegnare un valore 0 poiché un minimo di area permeabile ci può essere)

Rispetto alla tabella 7.1 ci sono delle classi stagionali in più, quelle intermedie; la tabella 7.4 riporta i limiti per queste stagioni. Ora ogni mese, per ogni componente, ha il limite inferiore, medio e superiore per AMC a seconda della classe stagionale presente (tab. 7.3): occorre ora trovare i limiti per ogni mese a livello di bacino e si può fare solo con una media pesata che consideri il peso di ciascuna componente (=area componente/area totale bacino). Le medie pesate sono riportate, per l'anno 2015, nelle tabelle 7.5 (limiti inferiori) e 7.6 (limiti superiori).

La tabella 7.7 riporta infine, per il 2015, i limiti AMC. Tali limiti variano di anno in anno a seconda delle aree delle componenti di uso del suolo, ma variano comunque di poco. Tornando al significato dell'AMC, se ad esempio nei 5 giorni precedenti l'evento precipitativo sono già piovuti 40mm, in maggio produrrà un certo RO (AMC II e CN II), la stessa pioggia in gennaio produrrà un RO maggiore

(AMC III e CN III). Questi valori, come vedremo, saranno utilizzati non per calcolare direttamente il RO (poiché occorre un altro metodo) ma per assegnare i valori al parametro B.

uso suolo	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
alberi	rip veg	rip veg	rip veg	sviluppo	sviluppo/mid	mid	mid	mid	mid	end	end	rip veg
grano invernale	sviluppo	sviluppo	sviluppo	sviluppo	mid	mid/end	end/nudo	nudo	nudo	nudo	nudo/iniz	iniziale/svil
girasole	nudo	nudo	nudo	nudo	iniziale	sviluppo	mid	mid/end	end/nudo	nudo	nudo	nudo
erba medica	rip veg	rip veg	rip veg	iniziale/svil	mid	mid	mid	mid	riposo veg	riposo veg	riposo veg	riposo veg
vigneto	rip veg	rip veg	rip veg	iniziale	sviluppo	sviluppo	mid	end	end	end	riposo veg	riposo veg
menta	rip veg	rip veg	rip veg	sviluppo	mid	mid/end	end	rip veg	rip veg	rip veg	rip veg	rip veg
avena	nudo	nudo	iniziale	iniziale/svil	svil/mid	mid	end/nudo	nudo	nudo	nudo	nudo	nudo
ginestre	rip veg	rip veg	rip.veg./svil	sviluppo	mid	mid	mid/end	end	rip veg	rip veg	rip veg	rip veg
arbusti/piccoli alberi	rip veg	rip veg	rip veg	sviluppo	sviluppo/mid	mid	mid	mid	mid	end	end	rip veg
impermeabile	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc

Tab. 7.2 – fasi fenologiche delle componenti di uso del suolo. È compreso anche l'impermeabile (strade, edificati)

uso suolo	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
alberi	dormant	dormant	dorm/aver	average	aver/grow	growing	growing	growing	growing	average	aver/dorm	dormant
grano invernale	dormant	dormant	dorm/aver	average	growing	grow/aver	aver/grow	growing	average	average	aver/dorm	dormant
girasole	dormant	dormant	dorm/aver	average	average	average	growing	grow/aver	average	average	aver/dorm	dormant
erba medica	dormant	dormant	dorm/aver	aver/grow	growing	growing	growing	growing	average	average	aver/dorm	dormant
vigneto	dormant	dormant	dorm/aver	average	average	average	growing	average	average	average	aver/dorm	dormant
menta	dormant	dormant	dorm/aver	average	growing	grow/aver	average	average	average	average	aver/dorm	dormant
avena	dormant	dormant	dorm/aver	dorm/aver	aver/grow	growing	average	average	average	average	aver/dorm	dormant
ginestre	dormant	dormant	dorm/aver	average	growing	growing	grow/aver	average	average	average	aver/dorm	dormant
arbusti/piccoli alberi	dormant	dormant	dorm/aver	average	aver/grow	growing	growing	growing	growing	average	aver/dorm	dormant
impermeabile	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc

Tab. 7.3 – assegnazione delle stagioni AMC alle corrispondenti fasi fenologiche mensili delle componenti di uso del suolo

tipo CN		limiti	dormant	average	growing	dorm/aver	aver/grow	grow/aver	aver/dorm
CN I	AMC I	inferiore	13	23	36	18	30	30	18
CN II	AMC II	medio	tra i due			tra i due			
CN III	AMC III	superiore	28	40	53	34	47	47	34

Tab. 7.4 – assegnazione limiti AMC alle varie classi

peso	Area ha	uso suolo	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
0,310	405,1	alberi	4,0	4,0	5,6	7,1	9,3	11,2	11,2	11,2	11,2	7,1	5,6	4,0
0,090	118,2	grano invernale	1,2	1,2	1,6	2,1	3,3	2,7	2,7	3,3	2,1	2,1	1,6	1,2
0,125	163,0	girasole	1,6	1,6	2,2	2,9	2,9	2,9	4,5	3,7	2,9	2,9	2,2	1,6
0,125	163,8	erba medica	1,6	1,6	2,3	3,8	4,5	4,5	4,5	4,5	2,9	2,9	2,3	1,6
0,013	17,0	vigneto	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
0,083	108,0	menta	1,1	1,1	1,5	1,9	3,0	2,5	1,9	1,9	1,9	1,9	1,5	1,1
0,083	108,0	avena	1,1	1,1	1,5	1,5	2,5	3,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,5	1,1
0,046	60,8	ginestre	0,6	0,6	0,8	1,1	1,7	1,7	1,4	1,1	1,1	1,1	0,8	0,6
0,056	73,0	arbusti/piccoli alberi	0,7	0,7	1,0	1,3	1,7	2,0	2,0	2,0	2,0	1,3	1,0	0,7
0,069	90,6	impermeabile	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1	1307,5	bacino	12	12	17	22	29	31	31	30	26	22	17	12

Tab. 7.5 – calcolo dei limiti INFERIORI mensili per AMC a livello di bacino – anno 2015

peso	Area ha	uso suolo	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
0,310	405,1	alberi	8,7	8,7	10,5	12,4	14,6	16,4	16,4	16,4	16,4	12,4	10,5	8,7
0,090	118,2	grano invernale	2,5	2,5	3,1	3,6	4,8	4,2	4,2	4,8	3,6	3,6	3,1	2,5
0,125	163,0	girasole	3,5	3,5	4,2	5,0	5,0	5,0	6,6	5,9	5,0	5,0	4,2	3,5
0,125	163,8	erba medica	3,5	3,5	4,3	5,9	6,6	6,6	6,6	6,6	5,0	5,0	4,3	3,5
0,013	17,0	vigneto	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
0,083	108,0	menta	2,3	2,3	2,8	3,3	4,4	3,9	3,3	3,3	3,3	3,3	2,8	2,3
0,083	108,0	avena	2,3	2,3	2,8	2,8	3,9	4,4	3,3	3,3	3,3	3,3	2,8	2,3
0,046	60,8	ginestre	1,3	1,3	1,6	1,9	2,5	2,5	2,2	1,9	1,9	1,9	1,6	1,3
0,056	73,0	arbusti/piccoli alberi	1,6	1,6	1,9	2,2	2,6	3,0	3,0	3,0	2,0	2,2	1,9	1,6
0,069	90,6	impermeabile	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
1	1307,5	bacino	26	26	32	38	45	47	47	46	41	37	32	26

Tab. 7.6 – calcolo dei limiti SUPERIORI mensili per AMC a livello di bacino – anno 2015

limiti AMC bacino 2015			gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
CN I	AMC I	<	12	12	17	22	29	31	31	30	26	22	17	12
CN II	AMC II	tra	13-25	13-25	18-31	23-37	30-44	32-46	32-46	31-45	27-40	23-36	18-31	13-25
CN III	AMC III	>	26	26	32	38	45	47	47	46	41	37	32	26

Tab. 7.7 – limiti per AMC nel bacino SMA nell'anno 2015

7.2.2 – calcolo del valore di CN nei quattro anni di bilancio

Ricordiamo che il CN di un bacino (o altro territorio) è funzione di:

- uso del suolo (comprese le gestioni e le condizioni idrologiche)
- permeabilità dei suoli
- pendenza del bacino
- AMC (*antecedent soil moisture conditions*)

La procedura per il calcolo del CN annuale a livello di bacino è la seguente:

1. riclassificazione dell'uso del suolo del bacino con le corrispondenti classi USDA (questo ha valore per tutti gli anni, lo si esegue una sola volta)
2. suddividere il territorio in zone a differente permeabilità (soil groups): questo ha valore per tutti gli anni, lo si esegue solo una volta;
3. incrociare le classi di uso suolo con le zone a differente permeabilità (es. incolto su soil group B, su soil group C ecc.) – si ottengono gli *hydrological soil cover complexes* di cui vanno determinate le aree (ogni anno gli incroci variano poiché variano le aree, soprattutto i tipi di seminativo);
4. fare la media pesata di ogni incrocio e ottenere il valore di CN per quella classe nell'anno considerato: ci dice quanto incide la classe nel ruscellamento totale;
5. la somma dei valori delle classi fornisce il **valore di CN** del bacino **nell'anno considerato**

L'uso del suolo del bacino è stato riclassificato secondo l'uso del suolo USDA, che prevede per i seminativi anche il tipo di coltivazione (a rittochino, secondo le curve di livello, terrazzato) e una condizione idrologica (*poor* o *good*, non è ben specificato ma forse si rifà alle condizioni generali di spessore, pendenza del terreno o di densità della coltura). La tabella 7.8 riporta la riclassificazione. Tra parentesi sono riportati i valori CN assegnati dall'USDA per ciascuno dei 4 soil groups nell'ambito della classe.

classe USDA [valori di CN associati ai 4 soil groups]	uso del suolo SMA
Urban districts: commercial and business (imp. 85%) [89, 92, 94, 95]	edificato residenziale e produttivo
Residential districts (imp. 65%) [77, 85, 90, 92]	area presso edificato
Residential districts (imp. 30%) [57, 72, 81, 86]	zona di cantiere A
Open space (grass cover > 75%) [39, 61, 74, 80]	aree verdi urbane
Paved parking lots, paved streets and roads [98, 98, 98, 98]	strade
Ferrovie [72, 82, 87, 89]	ferrovia
Brush-brush-forbs-grass mixture with brush the major element – poor conditions [48, 67, 77, 83]	zona di cantiere B
Pasture, grassland, or range-continuous forage for grazing – good conditions [39, 61, 74, 80]	terreno a riposo

Close-seeded or broadcast legumes or rotation meadow – contoured – good conditions [55, 69, 78, 83]	seminativo erba medica
Small grain – contoured – good conditions [61, 73, 81, 84]	seminativo grano
Row crops – contoured+crop residue cover – good conditions [64, 74, 81, 85]	seminativo girasole
Woods-grass combination – poor conditions [57, 73, 82, 86]	vigneto, frutteto, orti
Brush-brush-forbs-grass mixture with brush the major element – fair conditions [35, 56, 70, 77]	incolto
Woods-grass combination – good conditions [32, 58, 72, 79]	bosco rado
Woods – good conditions [30, 55, 70, 77]	bosco latifoglie
Woods – good conditions [30, 55, 70, 77]	bosco conifere
Rocce nude, rupi, affioramenti [80, 87, 93, 96]	affioramenti di roccia

Tab. 7.8 – riclassificazione dell'uso del suolo del bacino SMa secondo le classi CN USDA

Per quanto riguarda la permeabilità dei suoli, il territorio deve essere diviso in 4 aree, ognuna caratterizzata da suoli di una certa permeabilità: soil group A, B, C, D in ordine di permeabilità decrescente (D = meno permeabile). Per quanto riguarda il bacino SMa si sono create altre classi per avere un maggiore dettaglio e si sono assegnate le seguenti classi, in base al substrato geologico e alle coperture quaternarie (cap. 2.1.2):

substrato/copertura	Curve number gruppi idrologici
SCHLIER	C-D
DEPOSITI SU SCHLIER	C
MARNOSO ARENACEA	C
DEPOSITI SU MA	(B)-C
BISCIARO	B-C
DEPOSITI SU BISCIARO	B
ALLUVIONI E CONOIDI	A-B

Tab. 7.9 – assegnazione dei soil groups CN in funzione della litologia/copertura

Ci si è basati sulla permeabilità delle formazioni (Bisciaro >Marnoso Arenacea>Schlier) e sulla presenza di coperture quaternarie (conoidi, detriti di versante, aree in frana), più permeabili del substrato sottostante, che fanno salire di un livello la rispettiva litologia. Le alluvioni e conoidi sono quelle a maggiore permeabilità, ma come si può vedere non è stata assegnata la classe a minore permeabilità (soil group D, caratteristica di terreni fortemente argillosi) e quella a maggiore permeabilità (soil group A, caratteristica dei calcari carsificati).

Il passo successivo è stato assegnare i valori di CN ad ogni incrocio classe/soil group; infatti se si fossero utilizzati solo 4 soil groups l'assegnazione era già fatta (tab. 7.8) ma, come indicato in tabella

7.9, sono stati individuati 7 soil groups tra cui non ci sono il gruppo A e D. I valori sono stati ottenuti per interpolazione e la tabella seguente li riporta:

Uso suolo bacino Santa Maria degli Angeli	Soil group	Soil group	Soil group	Soil group	Soil group (B)-C	Soil group	Soil group	Soil group
	A	A-B	B	B-C		C	C-D	D
Edificato residenziale e produttivo [89, 92, 94, 95]	89	90	92	93	93	94	94	95
Area presso edificato [77, 85, 90, 92]	77	81	85	87	89	90	91	92
Zona di cantiere A [57, 72, 81, 86]	57	65	72	77	79	81	84	86
Aree verdi urbane [39, 61, 74, 80]	39	50	61	68	71	74	77	80
Strade [98, 98, 98, 98]	98	98	98	98	98	98	98	98
Ferrovie [72, 82, 87, 89]	72	77	82	84	86	87	88	89
Zona di cantiere B [48, 67, 77, 83]	46	56	67	72	74	77	80	83
Terreno a riposo [39, 61, 74, 80]	39	50	61	68	71	74	77	80
Seminativo a erba medica [55, 69, 78, 83]	55	62	69	73	76	78	80	83
Seminativo a grano [61, 73, 81, 84]	61	67	73	77	79	81	83	84
Seminativo a girasole [64, 74, 81, 85]	64	69	74	78	80	81	83	85
Vigneto, frutteto, orti [57, 73, 82, 86]	57	65	73	77	79	82	84	86
Incolto [35, 56, 70, 77]	35	46	56	63	67	70	74	77
Bosco rado [32, 58, 72, 79]	32	45	58	65	68	72	75	79
Bosco latifoglie [30, 55, 70, 77]	30	42	55	63	66	70	74	77
Bosco conifere [30, 55, 70, 77]	30	43	55	62	66	70	73	77
Affioramenti di rocce [80, 87, 93, 96]	80	83	87	90	92	93	95	96

Tab. 7.10 – assegnazione dei valori di CN alle classi di uso del suolo SMA. In giallo i soil groups effettivamente presenti nel bacino

Si noti che le classi di tabella 7.10 sono un po' più particolareggiate di quelle utilizzate per il calcolo dei Kc. In giallo sono riportati i soil groups effettivamente presenti nel bacino; degli incroci in giallo comunque, alcuni non sono presenti (alcune classi con poca area totale non incrociano tutti i soil groups, ad esempio non è presente l'incrocio tra "aree verdi urbane" e soil groups A-B e B).

In base alla superficie dei vari incroci (o *hydrological soil complexes*) si ottiene, mediante media pesata, un valore che è il contributo di quella classe al valore complessivo del CN (fig. 7.3 per il 2015) e quindi è il contributo al ruscellamento totale. Tale valore è funzione del CN della classe (fig. 7.4 per il 2015) ma soprattutto è funzione della superficie della classe: infatti il valore più alto lo hanno

i boschi che sono la classe più rappresentata. La somma dei valori delle classi fornisce il valore del bacino (73,9 per il 2015). Per quanto riguarda invece la fig. 7.4 essa rappresenta il valore di CN per ogni singola classe: si nota come i valori più alti li abbiano le classi a bassa permeabilità come gli edificati e le strade. Le aree boschive hanno basso valore di CN (favoriscono l'infiltrazione) ma contribuiscono grandemente al RO proprio per la loro estensione.

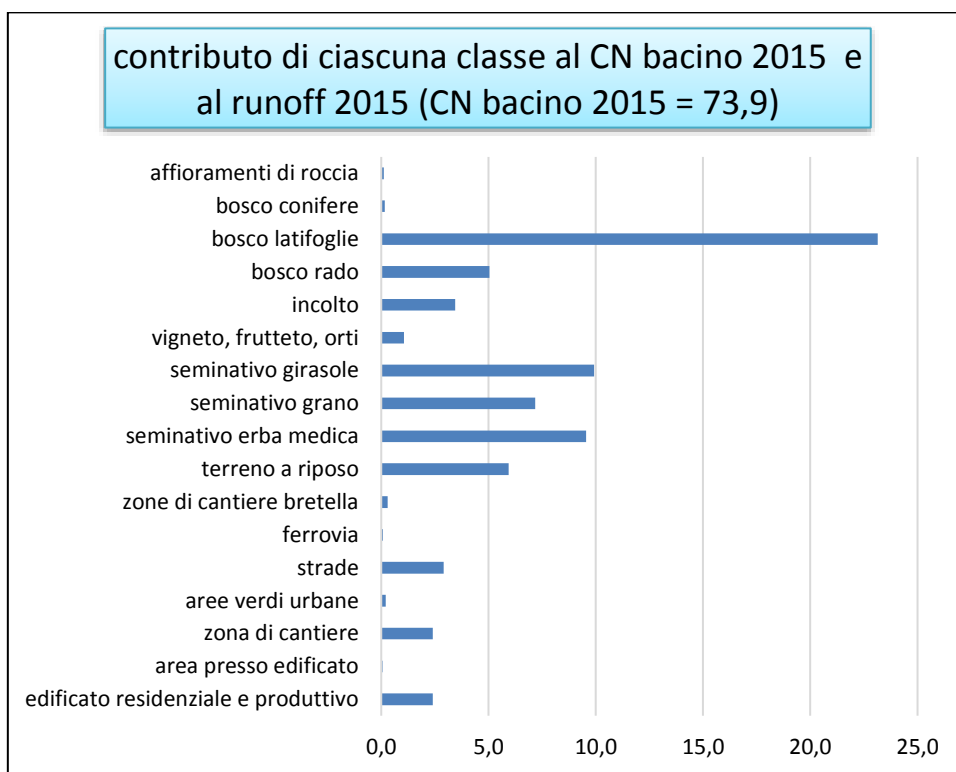


Fig. 7.3 – contributo di ciascuna classe di uso del suolo al CN del bacino e al runoff del bacino (anno 2015)

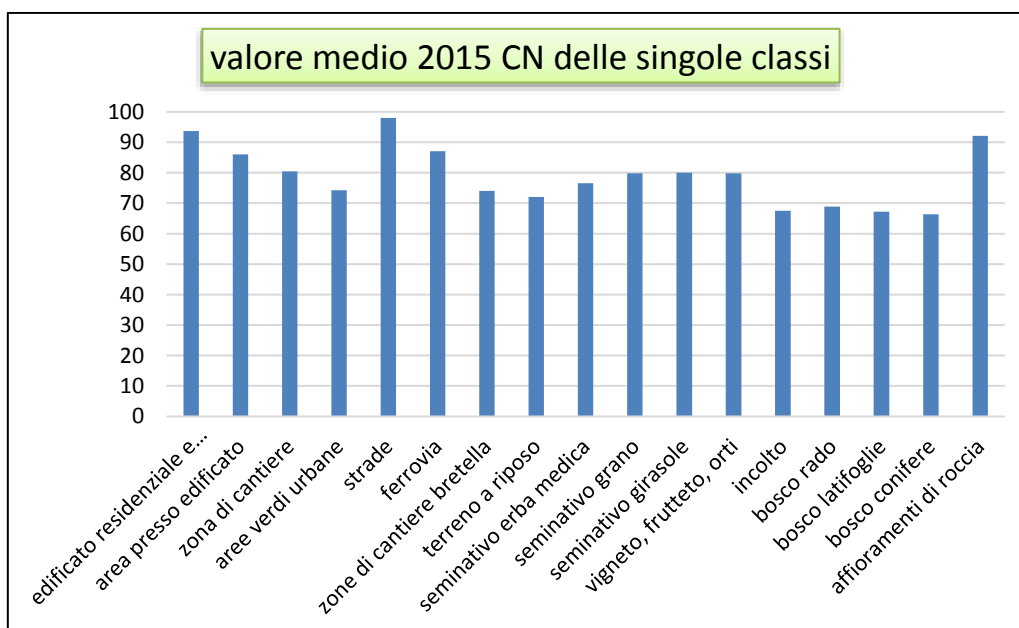


Fig. 7.4 – valore medio 2015 di CN di ciascuna classe, utile per capire in termini relativi in quale classe si ha più ruscellamento mentre in valore assoluto si fa riferimento al grafico di fig. 7.3

Il valore di curve number ottenuto va poi corretto per la pendenza media del bacino poiché è un fattore che è determinante nella determinazione del ruscellamento. Per il calcolo si è utilizzata la seguente formula (Kannan et al., 2013, Williams e Izzaurre, 2005):

$S_{2s} = S_2 \cdot \left(1,1 - \frac{STP}{STP + \exp(3,7 + 0,02117 \cdot STP)} \right)$	equazione 7.6
---	---------------

Ove S_{2s} è il valore della massima ritenzione associata a CN II corretto per la pendenza, CN II(s). Per ottenere CN II(s) basta sostituire il valore di S_{2s} nell'equazione 7.1. STP = pendenza media del bacino (%). S_2 è ovviamente il valore di S ricavato dall'equazione 7.2 utilizzando il valore di CN II trovato.

Per calcolare i valori di CN I(s) e CN III(s) si utilizzano le seguenti equazioni:

$CN_1 = CN_{2s} - \frac{20(100 - CN_{2s})}{100 - CN_{2s} + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN_{2s})]} \quad (4)$	equazione 7.7
$CN_3 = CN_{2s} \exp[(0,00673 \times (100 - CN_{2s}))] \quad (5)$	equazione 7.8

Nei 4 anni di bilancio si sono calcolati i seguenti valori:

anno	Tipo CN	valore	Tipo CN	valore
2013	CN II	73,9	CN I(s)	60,2
			CN II(s)	77,8
			CN III(s)	90,3
2014	CN II	74,1	CN I(s)	60,3
			CN II(s)	77,9
			CN III(s)	90,4
2015	CN II	73,9	CN I(s)	60,1
			CN II(s)	77,7
			CN III(s)	90,3
2016	CN II	73,8	CN I(s)	60,0
			CN II(s)	77,6
			CN III(s)	90,2

Tab. 7.11 – valori dei CN II e dei CN(s) (I, II e III) nei 4 anni di bilancio idrogeologico

7.2.3 – l'equazione di Williams per il calcolo del ruscellamento in continuo

L'equazione 7.5 consente di calcolare il RO per ogni data precipitazione. Il procedimento è il seguente: in base alla condizione AMC (I, II o III) viene corrisposto un CN(s) (I, II o III); dal CN si ricava S (eq. 7.2), quindi la (eq. 7.4) che entra nell'equazione 7.5. Il problema è che CN può variare molto da un giorno all'altro quando ci sono precipitazioni di notevole entità che condizionano molto la AMC: la tabella 7.12 è esplicativa:

limiti AMC: AMC I < 29mm AMC II se 29 < Pa < 45mm AMC III se Pa > 45mm				
giorno	precipitazioni (mm)	Valore AMC	Tipo AMC	Tipo CN
1	45		/	
2	3		/	
3	1		/	
4	0		/	
5	0		/	
6	4	49	AMC III	CN III
7	1	8	AMC I	CN I
8	50	6	AMC I	CN I
9	4	55	AMC III	CN III
10	10	59	AMC III	CN III
11	1	69	AMC III	CN III

Tab. 7.12 – simulazione di calcolo AMC e corrispondenti CN. I limiti sono ripresi da maggio 2015 ma le precipitazioni non sono reali

Se si ha una distribuzione di precipitazione come quella in tabella 7.12 si nota che tra i giorni 6 e 11 il CN passa da CN I a CN III repentinamente, senza neanche passare per CN II (e così fa il parametro S da cui deriva la); per la notevole pioggia del giorno 8, 50 mm, c'è un CN basso e quindi quella pioggia produrrà poco ruscellamento, ma è ragionevole che i suoli siano asciutti appena dopo una settimana della notevole precipitazione del primo giorno (45 mm)? Inoltre durante questa settimana ci sono state precipitazioni di minore entità che hanno contribuito a mantenere il suolo umido.

Per calcolare il RO in modo continuo occorre che CN e S varino in modo continuo: per questo Kannan et al. (2007), riprendendo quanto calcolato da Williams (2000), hanno riportato un'equazione che consentisse di calcolare il parametro S in modo continuo:

$S_t = S_{t-1} + ET_{0t} \cdot \exp\left(\frac{-B \times S_{t-1}}{S_{max}}\right) - P_{t-1} + Q_{t-1}$	equazione 7.9
--	---------------

ove:

S_t = parametro di ritenzione del giorno t

ET_{0t} = evapotraspirazione potenziale del giorno t (si è usata la ETC)

S_{t-1} = parametro di ritenzione del giorno t-1

B = parametro di deplezione (varia tra 0 e 2 in linea teorica)

P_{t-1} = precipitazione del giorno precedente (si è usata la Pa)

Q_{t-1} = ruscellamento del giorno precedente

S_{max} = massimo valore del parametro di ritenzione, corrispondente al valore di S che si ottiene ponendo nell'eq. 7.2 il valore di CN I(s)

Il valore di partenza di S, ovvero $S_{t=0}$, corrisponde al valore di S che si ottiene ponendo nell'eq. 7.2 il valore di CN II(s).

Questo metodo è stato anche adottato dalla Regione Friuli per la redazione del PRTA dove, tra l'altro, viene effettuata la classificazione del territorio secondo l'uso del suolo MOLAND (e non USDA come in questo lavoro). In tale lavoro, nella fase di calibrazione, è stato osservato che non è corretto il fatto che S_t possa scendere a 0, e quindi viene posto un limite inferiore S_{min} pari al valore di S calcolato con l'equazione 7.2 ponendo CN = CN III(s). Questo procedimento è stato adottato nel presente studio.

7.2.4 – stima del parametro B dell'equazione di Williams

Il parametro B indica la quota di deplezione di acqua dal terreno, e va calibrato confrontando il RO calcolato con il RO misurato alla sezione di chiusura. Nel modello di bilancio fenologico giornaliero (cap. 4.3), tuttavia, è necessario che il RO sia non un'incognita ma un parametro di ingresso (mentre è la percolazione profonda l'incognita da confrontare con il deflusso di base misurato alla sezione di chiusura) e quindi è stato necessario assegnare dei valori al parametro B. Kannan et al. indicano che il valore è compreso tra 0 e 2; il PRTA della Regione Friuli, da studi di taratura in letteratura, chiarisce che il valore vero dovrebbe essere compreso tra 0,5 e 1,5. Dato che al salire del parametro B aumenta anche il ruscellamento, è apparso ragionevole correlare il parametro B con il CN calcolato secondo il metodo tradizionale, come riportato in tabella 7.12. Si sono assegnati dei valori a B e poi, applicandoli all'equazione di Williams, si è calcolato il RO; tali valori di RO sono poi entrati nel bilancio fenologico il quale è stato tarato (cap. 10) e quindi si è visto che i valori del parametro B, per quanto tarati in maniera indiretta, possono essere abbastanza corretti. Le corrispondenze tra valori di B e CN sono le seguenti:

tipo AMC	Tipo CN	Valore parametro B
AMC I	CN I (s)	0,75
AMC II	CN II (s)	1
AMC III	CN III (s)	1,25

Tab. 7.13 – corrispondenza tra AMC, CN e valore del parametro B

La fig. 7.14 riporta un periodo di calcolo dell'anno 2015 (tra gennaio e febbraio i limiti AMC non cambiano, si veda la tab. 7.7).

giorno	Pa	limiti AMC		AMC	tipo CN	valore B
		inferiore	superiore			
20/01/2015	0,5	12	26	1,5	CN I	0,75
21/01/2015	24,2	12	26	2,0	CN I	0,75
22/01/2015	0,1	12	26	26,2	CN III	1,25

23/01/2015	1,1	12	26	26,3	CN III	1,25
24/01/2015	13,7	12	26	27,4	CN III	1,25
25/01/2015	0,1	12	26	39,7	CN III	1,25
26/01/2015	0,0	12	26	39,2	CN III	1,25
27/01/2015	3,3	12	26	15,0	CN II	1
28/01/2015	2,0	12	26	18,2	CN II	1
29/01/2015	0,9	12	26	19,1	CN II	1
30/01/2015	4,9	12	26	6,2	CN I	0,75
31/01/2015	12,4	12	26	11,1	CN I	0,75
01/02/2015	2,9	12	26	23,5	CN II	1
02/02/2015	9,3	12	26	23,1	CN II	1
03/02/2015	3,4	12	26	30,4	CN III	1,25
04/02/2015	2,2	12	26	32,8	CN III	1,25
05/02/2015	1,1	12	26	30,1	CN III	1,25
06/02/2015	3,2	12	26	18,8	CN II	1

Tab. 7.14 – un periodo di calcolo del parametro B tra gennaio e febbraio 2015

Il valore di B corrispondente a CN I(s) può anche essere abbassato a 0,65, in alcuni casi sembra lavorare meglio ma è da valutare più approfonditamente.

7.2.5 – calcolo del ruscellamento CN step by step

Di seguito si illustrano i passi per il calcolo del ruscellamento:

- 1) calcolo dei valori $S_{t=0}$, S_{max} e S_{min} (inserimento nell'eq. 7.2 dei valori di CN II(s), CN I(s) e CN III(s));
- 2) per ogni giorno di simulazione vanno inseriti la precipitazione (Pa), ETC, B: sono i dati base;
- 3) per ogni giorno va calcolata S_t , con valore di partenza pari a $S_{t=0}$, applicando la formula 7.9;
- 4) per ogni giorno va calcolata la *initial abstraction* ($=0,2 \cdot S_t$)
- 5) per ogni giorno va calcolato il ruscellamento (Q) con la formula 7.5;
- 6) se $Q < 0$, si pone $Q = 0$;
- 7) Se S_t scende al di sotto di S_{min} , si sostituisce con il valore di S_{min} ;
- 8) Se S_t sale al di sopra di S_{max} , si sostituisce con il valore di S_{max}

Le formule, nel foglio di calcolo, possono essere copiate per tutti i giorni dell'anno ma poi il calcolo va effettuato giorno per giorno perché il valore di S_t determina tutti i valori dei giorni successivi; allora al termine del giorno occorre vedere se $Q < 0$ o no, e il giorno seguente occorre vedere se S_t scende sotto S_{min} o supera S_{max} .

Di seguito si riportano, a scopo esemplificativo, 4 periodi caratteristici del calcolo del ruscellamento nel 2015.

Primo periodo: discesa di S_t fino a S_{min}

In alto a sinistra sono riportati tutti i valori di CN. Durante i primi giorni di febbraio piove ma in maniera debole e non c'è ruscellamento (Q) in quanto $P-la < 0$. Con la formula si ha che $Q > 0$ ma va sostituito con il valore 0 (Q non ci può essere se l'*initial abstraction* non si è saturata, ovvero se $P-la < 0$). Tuttavia S_t scende e alle prime piogge consistenti scende al di sotto di S_{min} : allora il valore di S_t va rimpiazzato con S_{min} . Inizia anche il ruscellamento Q. Quando S_t risale al di sopra di S_{min} non c'è più bisogno di sostituzione. Durante i primi mesi dell'anno è frequente che S_t scenda al di sotto di S_{min} , poi ad un certo punto inizia a salire.

CN II		73,9	
CN I (s)	60,1	Smax	168,48
CN II (s)	77,7	Smin	27,32
CN III (s)	90,3		

giorno	Pa	ETc	B	St	la	P-la	Q (mm)
31/01/2015	0,1	1,46	0,75	59,823	11,965	-11,8	0,0
01/02/2015	1,8	0,53	1	60,067	12,013	-10,2	0,0
02/02/2015	0,1	1,27	1	59,172	11,834	-11,8	0,0
03/02/2015	0,0	0,96	1,25	59,731	11,946	-11,9	0,0
04/02/2015	10,6	0,70	1,25	60,178	12,036	-1,4	0,0
05/02/2015	29,2	0,44	1,25	49,842	9,968	19,3	5,4
06/02/2015	48,2	0,36	1	27,319	5,464	42,7	26,0
07/02/2015	7,7	0,43	1	27,319	5,464	2,3	0,2
08/02/2015	3,2	1,20	0,75	27,319	5,464	-2,3	0,0
09/02/2015	0,2	1,38	0,75	27,319	5,464	-5,2	0,0
10/02/2015	0,0	1,16	0,75	28,095	5,619	-5,6	0,0
11/02/2015	0,0	1,21	0,75	29,162	5,832	-5,8	0,0
12/02/2015	0,0	1,16	1	30,140	6,028	-6,0	0,0

Tab. 7.15 – primo periodo del modello di calcolo del ruscellamento -anno 2015

Secondo periodo: fase intermedia con S_t compreso tra min e max con produzione di ruscellamento

Il titolo è esplicativo: S_t assume valori intermedi e con piogge di una certa consistenza vi è RO ($Q>0$). Si noti il drastico calo di S_t dopo un giorno di forte pioggia/RO. S_t dipende però anche da ETC e da B. il valore di B (=0,75) ci dice che se avessimo applicato il metodo tradizionale saremmo stati in condizione di CN I(s).

giorno	Pa	ETc	B	S_t	la	P-la	Q (mm)
19/05/2015	0,0	6,12	0,75	94,263	18,853	-18,9	0,0
20/05/2015	0,0	4,86	0,75	97,458	19,492	-19,5	0,0
21/05/2015	0,0	4,98	0,75	100,688	20,138	-20,1	0,0
22/05/2015	66,5	1,13	0,75	101,410	20,282	46,2	14,5
23/05/2015	15,0	1,89	0,75	50,600	10,120	4,8	0,4
24/05/2015	6,2	2,17	0,75	37,795	7,559	-1,3	0,0
25/05/2015	0,1	3,97	0,75	34,905	6,981	-6,9	0,0
26/05/2015	1,6	3,33	0,75	37,696	7,539	-6,0	0,0
27/05/2015	15,9	2,36	0,75	38,127	7,625	8,3	1,5
28/05/2015	0,0	4,88	0,75	27,819	5,564	-5,6	0,0
29/05/2015	0,0	5,33	0,75	32,526	6,505	-6,5	0,0

Tab. 7.16 – secondo periodo del modello di calcolo del ruscellamento -anno 2015

Terzo periodo: S_t raggiunge S_{max}

Siamo in estate, piove poco e le poche piogge non producono RO. Fanno calare un poco S_t ma il calo è breve, i grandi valori di ETC spingono in alto S_t che supera S_{max} : a questo punto occorre sostituire S_t con S_{max} (il cui valore non può essere superato).

giorno	Pa	ETc	B	S_t	la	P-la	Q (mm)
15/07/2015	0,0	5,01	0,75	162,544	32,509	-32,5	0,0
16/07/2015	2,9	5,09	0,75	165,014	33,003	-30,1	0,0
17/07/2015	0,0	6,11	0,75	165,070	33,014	-33,0	0,0
18/07/2015	0,0	5,30	0,75	167,611	33,522	-33,5	0,0
19/07/2015	0,0	6,02	0,75	168,475	33,695	-33,7	0,0
20/07/2015	0,0	5,56	0,75	168,475	33,695	-33,7	0,0
21/07/2015	0,0	5,25	0,75	168,475	33,695	-33,7	0,0
22/07/2015	0,0	4,78	0,75	168,475	33,695	-33,7	0,0
23/07/2015	0,0	5,47	0,75	168,475	33,695	-33,7	0,0
24/07/2015	0,1	4,50	0,75	168,475	33,695	-33,6	0,0

Tab. 7.17 – terzo periodo del modello di calcolo del ruscellamento -anno 2015

Quarto e quinto periodo: S_t scende definitivamente sotto S_{max} e dopo un paio di mesi raggiunge S_{min}

Gli ultimi due periodi sono assieme; nel quarto periodo le prime consistenti piogge non producono RO (poiché S_t è al max e *initial abstraction* è molto elevata) ma il parametro S_t inizia a scendere in modo definitivo. Dopo un paio di mesi raggiunge di nuovo S_{min} e ruoterà attorno a S_{min} fino alla fine dell'anno. Il RO era già iniziato in precedenza ma ora che S_t è ai minimi anche la *initial abstraction* è bassa ed è più facile produrre ruscellamento.

giorno	Pa	ETc	B	St	la	P-la	Q (mm)
20/09/2015	0,0	1,92	0,75	168,475	33,695	-33,7	0,0
21/09/2015	0,0	2,00	0,75	168,475	33,695	-33,7	0,0
22/09/2015	0,0	2,10	0,75	168,475	33,695	-33,7	0,0
23/09/2015	9,4	1,78	0,75	168,475	33,695	-24,3	0,0
24/09/2015	31,6	1,26	0,75	159,638	31,928	-0,3	0,0
25/09/2015	8,2	0,79	0,75	128,388	25,678	-17,5	0,0
26/09/2015	0,3	1,35	0,75	120,965	24,193	-23,8	0,0
27/09/2015	0,9	2,68	0,75	122,185	24,437	-23,6	0,0
...
...
17/11/2015	0,1	0,20	0,75	32,559	6,512	-6,4	0,0
18/11/2015	0,0	0,35	1,25	32,711	6,542	-6,5	0,0
19/11/2015	0,3	0,74	1,25	33,292	6,658	-6,4	0,0
20/11/2015	0,0	2,87	1,25	35,252	7,050	-7,1	0,0
21/11/2015	8,9	2,67	1,25	37,308	7,462	1,4	0,1
22/11/2015	19,6	0,55	1,25	28,907	5,781	13,8	4,5
23/11/2015	10,4	0,41	0,75	27,319	5,464	5,0	0,8
24/11/2015	0,0	0,44	0,75	27,319	5,464	-5,5	0,0
25/11/2015	0,4	0,42	0,75	27,686	5,537	-5,1	0,0
26/11/2015	3,9	0,87	0,75	28,020	5,604	-1,7	0,0
27/11/2015	7,9	0,80	0,75	27,319	5,464	2,4	0,2
28/11/2015	0,0	0,47	0,75	27,319	5,464	-5,5	0,0
29/11/2015	0,1	0,52	0,75	27,783	5,557	-5,5	0,0
30/11/2015	0,0	1,44	0,75	28,993	5,799	-5,8	0,0

Tab. 7.18 – terzo periodo del modello di calcolo del ruscellamento -anno 2015

CAPITOLO 8 – LA RISERVA IDRICA DEI SUOLI, IL COEFFICIENTE DA STRESS IDRICO E LA EVAPOTRASPIRAZIONE REALE

8.1– LA RISERVA IDRICA DEI SUOLI

8.1.1 – la riserva idrica totale del suolo (TW)

Ci sono tre “serbatoi” d’acqua in un profilo di suolo, e uno contiene l’altro:

- 1) La riserva idrica totale (TW, o capacità di ritenzione idrica); contiene la 2 e la 3;
- 2) La riserva idrica dei suoli disponibile (TAW, total available water); contiene la 3;
- 3) La riserva idrica facilmente utilizzabile dalle piante (RAW, rapidly available water).

Tutti i valori di riserva sono espressi in mm.

La quantità di acqua totale di un profilo di suolo, teoricamente utilizzabile dalle piante, è la *capacità di ritenzione idrica* (potremmo chiamarla TW, total water) e dipende solo dalla tessitura dei suoli e dalla profondità del suolo (prima di giungere all’orizzonte impermeabile o al substrato); è l’acqua compresa tra la capacità di campo (*field capacity*) e il punto di appassimento (*wilting point*, fig. 8.1). Le tessiture di medio fine impasto, come i terreni franchi, franchi-limoso, franchi-argillosi hanno una capacità di ritenzione idrica maggiore. Le corrispondenze tra i termini in inglese e in italiano sono:

Sand = sabbioso

Sandy loam = franco sabbioso

Loam = franco

Silt loam = franco limoso

Clay loam = franco argilloso

Clay = argilloso

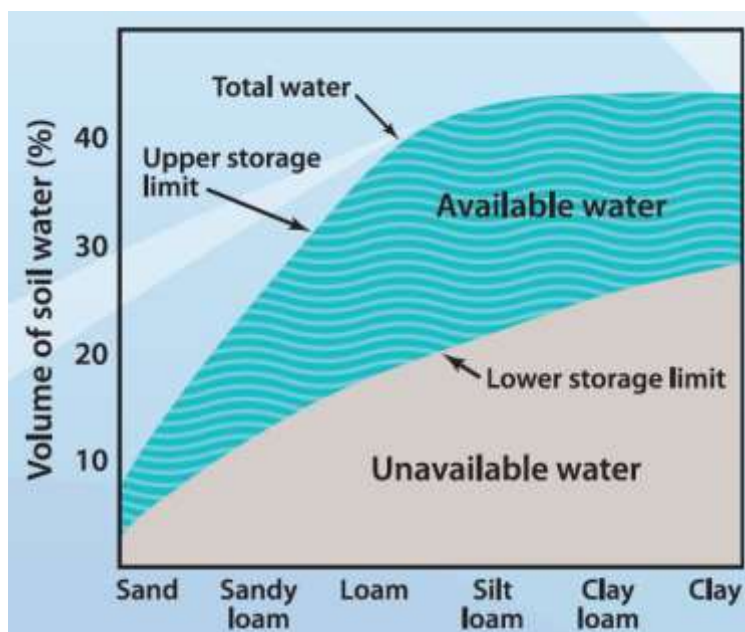


Fig. 8.1 – i due livelli entro cui è compresa l’acqua disponibile per le piante, la capacità di campo (*upper storage limit*) e punto di appassimento (*lower storage limit*)

La *capacità di campo* è l’acqua che resta nel terreno dopo che l’acqua di gravità è percolata in basso (percolazione profonda, uno dei parametri del bilancio fenologico giornaliero, cap. 4.3)

mentre il *punto di appassimento* è la quantità di acqua che è trattenuta così forte dalle particelle del terreno da essere praticamente non assorbibile dalle piante poiché non riescono ad esercitare abbastanza forza (fig. 8.2).

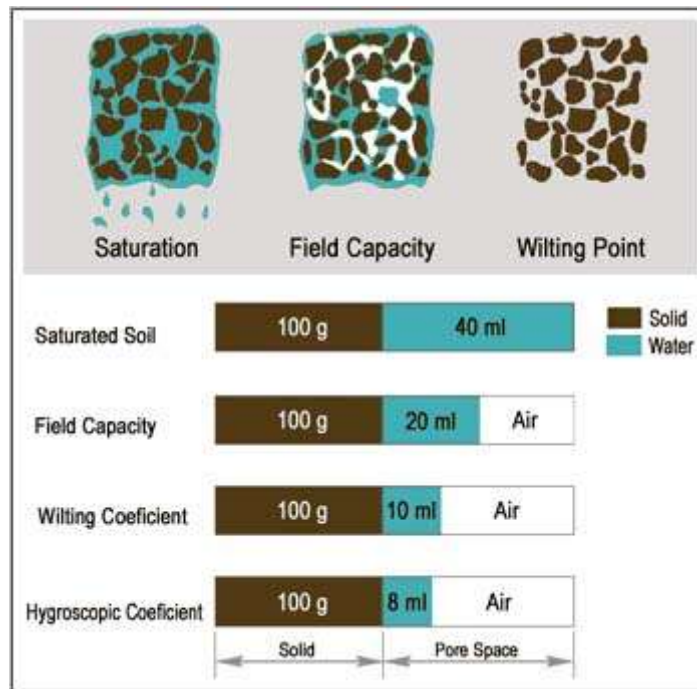


Fig. 8.2 – acqua gravifica, alla capacità di campo, al punto di appassimento e % di terreno-acqua-pori nei tre punti. Queste ultime proporzioni variano a seconda della tessitura

Il range di potenziale idrico corrispondente all'acqua estraibile dalle piante viene assunto, generalmente, compreso tra 0,05 bar e 15 bar (valori negativi) ma ovviamente può variare in funzione del tipo di suolo e di vegetazione. La pianta inizia ad estrarre acqua dal suolo già a 0,05 bar ma per estrarre tutta l'acqua della riserva occorre una suzione di 15 bar. Per estrarre l'acqua facilmente disponibile occorre arrivare a una suzione di 2 bar (si estrae acqua presente nei pori più grandi, diametro tra 60µm e 2µm) (McRae, 1991).

8.1.2 – la riserva idrica disponibile del suolo (TAW), la riserva idrica facilmente disponibile del suolo (RAW), il coefficiente p , il coefficiente da stress idrico K_s , la ET_cR

La TAW è il serbatoio a cui le piante/colture possono attingere in caso di assenza di precipitazioni. Abbiamo visto la sua importanza nel bilancio idrogeologico giornaliero su base fenologica (cap. 4.3), e abbiamo visto quanta acqua si muove al suo interno nel corso dell'anno (ΔR). Essa dipende dalla tessitura dei suoli, come nel caso della TW, ma la profondità del suolo viene sostituita dalla profondità delle radici, che è la profondità a cui può avvenire la suzione; essendo quest'ultima quasi sempre inferiore alla profondità massima del suolo, ne deriva che quasi sempre $TAW \leq TW$.

La TAW (mm) si calcola per mezzo della seguente equazione:

$TAW = 1000 \cdot (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \cdot Z_r$	equazione 8.1
--	---------------

Dove:

θ_{FC} = il contenuto di acqua alla capacità di campo (m^3/m^3)

θ_{WP} = il contenuto di acqua al punto di appassimento (m^3/m^3)

Z_r = profondità delle radici della coltura/pianta/erba (m)

Come scritto in precedenza occorre tuttavia una certa pressione da parte delle piante per estrarre l'acqua più fortemente trattenuta dalle particelle di terreno, anche se queste rientrano entro i limiti della profondità delle radici; l'acqua che è più facilmente utilizzabile dalle piante è la RAW.

La RAW è funzione della TAW secondo un parametro p:

$RAW = p \cdot TAW$	equazione 8.2
---------------------	---------------

Il parametro p varia giornalmente secondo la ET_c del giorno, e varia anche da una coltura/pianta/erba a un'altra. Di solito è compreso in un range tra 0,30 per piante con radici superficiali ad alti tassi di ET_c (>8mm/day) a 0,70 per piante con radici profonde e a bassi valori di ET_c (< 3mm/day). Comunemente è utilizzato un valore di 0,50 per la maggior parte delle colture (quaderno FAO n°56, chap.8). Tuttavia il quaderno FAO (tab 22 ch.8) presenta valori di p differenti per ogni coltura, e riporta anche le profondità massime delle radici. Il valore di p, per ogni coltura, va aggiustato secondo la ET_c del giorno con la seguente equazione:

$p = p_{\text{tabella FAO}} + 0,04 \cdot (5 - ET_c)$	equazione 8.3
--	---------------

Infatti a basse ET_c il parametro p sale e c'è più acqua facilmente disponibile, ed è più difficile entrare in stress idrico; viceversa per alti valori di ET_c (estate). L'equazione 8.3 vale per $0,1 < p < 0,8$. Come per tutti i parametri, anche per p si è trovato un valore unico a livello di bacino. In base all'eq. 8.3 il parametro p viene calcolato su base giornaliera, ma per non avere troppe ondulazioni della RAW si sono usati valori medi mensili (anche il quaderno FAO suggerisce di utilizzare valori medi per uno specifico periodo di crescita piuttosto che valori giornalieri).

Quando la deplezione di acqua dalla riserva ($Dr_{i, end}$, cap. 4.3) sale fino a superare il valore della RAW allora la coltura (nel nostro caso il bacino) entra in stress idrico e questo è indicato dal coefficiente da stress idrico (K_s) che scende sotto il valore di 1. L'equazione è la seguente:

$K_s = \frac{TAW - Dr_{i, end}}{TAW - RAW}$	equazione 8.4
---	---------------

Ne consegue che la evapotraspirazione reale del giorno, ET_{cR} , è funzione della ET_0 secondo tre coefficienti:

$ET_{cR} = ET_0 \cdot Ca \cdot K_c \text{ bac} \cdot K_s$	equazione 8.5
---	---------------

Dove:

ET_{cR} = evapotraspirazione reale (mm)

ET_0 = evapotraspirazione potenziale calcolata con la formula di Penman Monteith (mm)

Ca = coefficiente d'acclività (cap. 5)

Kc bac = coefficiente colturale unico a livello di bacino, che considera l'effettivo uso del suolo nelle sue fasi fenologiche durante l'anno (cap. 6)

Ks = coefficiente da stress idrico

8.2– CALCOLO DELLA RISERVA IDRICA E DEL PARAMETRO p NEI 4 ANNI DI BILANCIO

8.2.1 – il rilevamento ASSAM 2003: profilo del suolo

Non ci sono studi pedologici sui suoli del bacino Santa Maria degli Angeli ad eccezione di un profilo completo di suolo che l'ASSAM (Agenzia Servizi Settore Agroalimentare delle Marche) ha realizzato nel 2003 in località Cerreto, nel podere la cui ubicazione è indicata nella mappa di fig. 8.3 e la cui foto è riportata in fig. 8.4. Il rilevamento è stato fatto per la Carta dei suoli della Regione Marche alla scala 1:250000.



Fig. 8.3 – ubicazione del profilo completo di suolo realizzato dall'ASSAM nel 2003

Il luogo è un podere a seminativo posto su una conoide alluvionale, in moderata pendenza.



Fig. 8.4 – il podere a seminativo su cui è stato effettuato il rilevamento ASSAM 2003

La tabella 8.1 riporta, per i vari orizzonti del profilo, le % delle varie classi granulometriche nel rilevamento ASSAM 2003. Il suolo è stato assegnato dall'ASSAM all'unità tipologica di suolo MECCIANO (Carta dei suoli della Regione Marche, ASSAM, 2006).

N° orizz.	Class. di campagna	Profondità (cm)	Tipo orizzonte	% sabbia	% limo	% argilla	% pietre
1	Ap	0-55	superficiale	12,2	51,6	36,2	3
2	BA	55-105	profondità	13,2	51,2	35,6	1
3	2Bk(BC)	105-160	profondità	28,1	47,1	24,8	0
4	2BC	160-195	profondità	Non indicato nel report			0,5

Tab. 8.1 – orizzonti e tessitura del rilevamento ASSAM 2003

Ne consegue che gli orizzonti possono essere assegnati alle seguenti classi tessiturali con corrispondenti TW (dati θ_{FC} e θ_{WP} da tabella 19, chap. 7, quaderno FAO n°56):

N° strato	Classe tessiturale	Spessore (m)	θ_{FC} (m ³ /m ³)	θ_{WP} (m ³ /m ³)	mm acqua strato** (TAW)*
1	Franco limoso argilloso	1,05	0,335	0,205	137
2	Franco	0,85	0,335	0,205	117
TW profilo (mm)					254

Tab. 8.2 – assegnazione degli orizzonti del profilo ASSAM 2003 a corrispondenti classi tessiturali e determinazione della riserva idrica teorica del profilo (TW)

* equazione 8.1 ponendo al posto della Z, lo spessore dello strato

**non sono proprio orizzonti poiché ne riuniscono due ciascuno

Non si è tenuto conto della pietrosità; in presenza di pietre la riserva è di poco inferiore poiché le pietre occupano lo spazio disponibile per l'acqua.

8.2.2 – Calcolo di un valore unico di riserva idrica per il bacino nei 4 anni di bilancio

Dalla tabella 8.2 consegue che la TW per questo profilo di suolo è di 254 mm. In questo calcolo non è utilizzata la profondità delle radici ma la profondità del profilo: 254 mm sono l'acqua compresa tra la capacità di campo e il punto di appassimento per tutto il profilo, e questo è un dato che non cambia negli anni (perlomeno nel breve periodo, considerando i lunghi tempi della pedogenesi).

Quando si va a calcolare la TAW, invece, occorre determinare la **profondità media delle radici** del bacino; questo è un dato che varia di anno in anno perché variano le aree coperte da alberi, arbusti, grano, girasole, ecc. (soprattutto le colture cambiano di anno in anno, come visto nel cap. 3). È stato necessario assegnare delle profondità per ogni componente di uso del suolo; laddove questa informazione non era fornita dal quaderno FAO (tab.22, ch.8) si sono reperite altre informazioni in letteratura. Per ogni coltura inoltre è stato assegnato un valore p (sempre tab. 22, ch.8, quad. FAO 56) e quindi, in base alle superfici delle componenti (e ai rispettivi pesi = superficie componente/superficie bacino) si è trovato un valore unico di profondità delle radici e del parametro p. La tab. 8.3 riporta il calcolo per il 2015:

anno 2014	profondità max radici	p	area	peso		
grano	1,50	0,55	118,2	0,097	0,15	0,05
girasole	1,15	0,45	163,0	0,134	0,15	0,06
vigneto	1,50	0,45	17,0	0,014	0,02	0,01
erba medica	1,60	0,55	163,8	0,135	0,22	0,07
avena	1,25	0,55	108,0	0,089	0,11	0,05
menta	0,60	0,4	108,0	0,089	0,05	0,04
ginestre	0,70	0,6	60,8	0,050	0,03	0,03
arbusti/piccoli alberi	1,30	0,5	73,0	0,060	0,08	0,03
alberi	1,50	0,5	405,1	0,333	0,50	0,17
				bacino	1,313	0,505
					profondità	parametro p

Tab. 8.3 – calcolo profondità media delle radici e parametro p per l'anno 2015

Il parametro p viene calcolato giornalmente in funzione della ETc (eq. 8.3) e poi applicato in media mensile al bilancio.

Il valore di 1,313 metri di profondità delle radici va utilizzato al posto della profondità massima del profilo poiché al di sotto di questa profondità nel bacino, in media, le piante/colture/erbe non riescono ad assorbire acqua. La tab. 8.2, utilizzata per il calcolo della TW, viene ora modificata per il calcolo della TAW, e diviene quindi:

N° strato	Classe tessiturale	Spessore (m)	θ_{FC} (m ³ /m ³)	θ_{WP} (m ³ /m ³)	mm acqua strato** (TAW)*
1	Franco limoso argilloso	1,05	0,335	0,205	137
2	Franco	0,263	0,335	0,205	34
TAW profilo (mm)					171

Tab. 8.4 – calcolo della TAW dei suoli di maggiore spessore per il bacino SMA nell'anno 2014

Questo è un valore di un podere posto in un'area (conoide alluvionale) dove i suoli sono abbastanza spessi. Non può essere preso come valore di riferimento per tutto il bacino che presenta suoli anche più sottili. Si sono divisi i suoli del bacino in tre categorie:

- 1) Suoli spessi (a cui appartiene il profilo realizzato)
- 2) Suoli mediamente spessi
- 3) Suoli sottili

Si è ipotizzato che i suoli spessi abbiano spessore doppio dei suoli sottili, e che i mediamente spessi abbiano un valore intermedio. Le riserve idriche sono conseguenza di ciò: quindi per il 2014 ai suoli spessi è stata assegnata una riserva di 171 mm, ai suoli sottili 86 mm e ai suoli intermedi 128mm. Come individuare tali suoli nel bacino? Sulla base delle tab. 2.3 e 3.6 (che vengono riproposte per semplicità) emerge chiaramente che le aree su depositi continentali quaternari sono a pendenza inferiore rispetto alle zone ove affiora (sotto il suolo) il substrato, ed emerge che le aree a seminativo sono su pendenze minori rispetto alle altre classi di uso del suolo. A minore pendenza certamente corrispondono suoli più spessi. Inoltre le aree su depositi quaternari (conoidi alluvionali, aree

alluvionali, zone in frana, detriti di versante) hanno suoli più spessi poiché i depositi hanno materiale meno resistente e più soggetto a pedogenesi.

SUBSTRATO	PENDENZA MEDIA (%)
Depositi continentali quaternari	30,6
Aree su Bisciario	42,1
Aree su Schlier	34,3
Aree su Marnoso Arenacea	32

Tabella 2.3 (ripresa dal cap. 2) – pendenza media dei depositi continentali quaternari e delle aree esterne su cui affiorano le diverse formazioni

Principali classi di uso del suolo 1997	Pendenza media (%)	Pendenza media (°)	Coefficiente di acclività
Seminativi	24	14	1,031
Terreno a riposo	27	15,1	1,036
Incolto	37	20,3	1,066
Bosco rado	39	21,3	1,073
Bosco	44	23,7	1,092

Tab. 3.6 (ripresa dal cap. 3) – pendenza media dei principali uso del suolo del bacino SMa nel 1997, con coefficiente di acclività

Come conseguenza si è assunta la corrispondenza tra spessore dei suoli e uso del suolo/coperture litologiche riportata in tabella 8.4; la tabella riporta anche le superfici e i pesi, che non variano di anno in anno poiché i seminativi sono assieme e si presume che l'area totale dei seminativi (compresi i terreni a riposo) resti stabile nel breve periodo. Viene riportato anche il calcolo della TAW per l'anno 2015.

incrocio uso-coperture	area	peso	TAW attribuita	peso x TAW
seminativi su depositi	368	0,28	171	48
resto dei seminativi e resto dei depositi	488	0,37	128	48
resto del bacino	453	0,35	85	30
somma	1309	1		125,2 mm

TAW bacino

Tab. 8.5 – calcolo della TAW per il 2015 mediante spazializzazione della TAW sul bacino

La riserva disponibile varia di poco di anno in anno, e varia poiché varia la distribuzione delle superfici delle componenti di uso del suolo, che fa variare la profondità media delle radici. I valori della TAW nei 4 anni di bilancio sono riportati in tab. 8.5.

anno	TAW (mm)
2013	127,6
2014	129,5
2015	125,2
2016	129,3

Tab. 8.6 – valori della riserva idrica disponibile (TAW) nei 4 anni di bilancio

9.1– METODOLOGIA NELL'ESECUZIONE DELLE MISURE DELLE PORTATE

9.1.1 – Il deflusso di base

Al fine di poter calibrare e validare il bilancio (cap. 10.1) si è reso necessario monitorare il deflusso di base alla sezione di chiusura del bacino, presso Bivio Borzaga (figg. 2.14 e 2.15). Il deflusso di base (fig. 9.1) è formato dall'acqua che si infiltra e riemerge nel bacino (anche attraverso l'innalzamento delle falde acquifere e il successivo drenaggio dei corsi d'acqua minori o del principale), per questo si è reso necessario effettuare le misure lontano da eventi di pioggia. Il tempo di corrivazione del bacino (T_c), ovvero il tempo che impiega una goccia d'acqua per raggiungere la sezione di chiusura del bacino dal punto più lontano via deflusso superficiale (ruscellamento, RO), è di 1,47 ore (tab. 2.5), circa 88 minuti. La piena del corso d'acqua sarà maggiore se una pioggia ha durata pari o superiore al T_c : infatti in quel momento tutta la superficie del bacino starà fornendo acqua di ruscellamento al corso d'acqua (poi dipende dall'intensità della pioggia, dalla saturazione dei suoli, ecc., si veda il cap. 8). Ovviamente tale tempo non viene impiegato dalla goccia a scorrere solo in superficie poiché è presumibile che raggiunga prima un corso d'acqua minore che confluisce nel maggiore. Dopo circa due ore dal termine della pioggia il RO è terminato ma giunge ancora acqua per via di deflusso ipodermico (l'acqua scorre nei suoli). Il tempo di deflusso ipodermico non è calcolabile, potremmo supporre almeno un giorno ma è presumibile sia maggiore (ma andrebbe indagato). Anche in questo caso dipende dallo stato di saturazione dei suoli, dalle pendenze ecc. Dopo un giorno (come minimo) dalla fine della precipitazione le misure di portata dovrebbero riferirsi al deflusso di base; l'acqua persa per RO viene calcolata con il metodo CN (cap. 9).

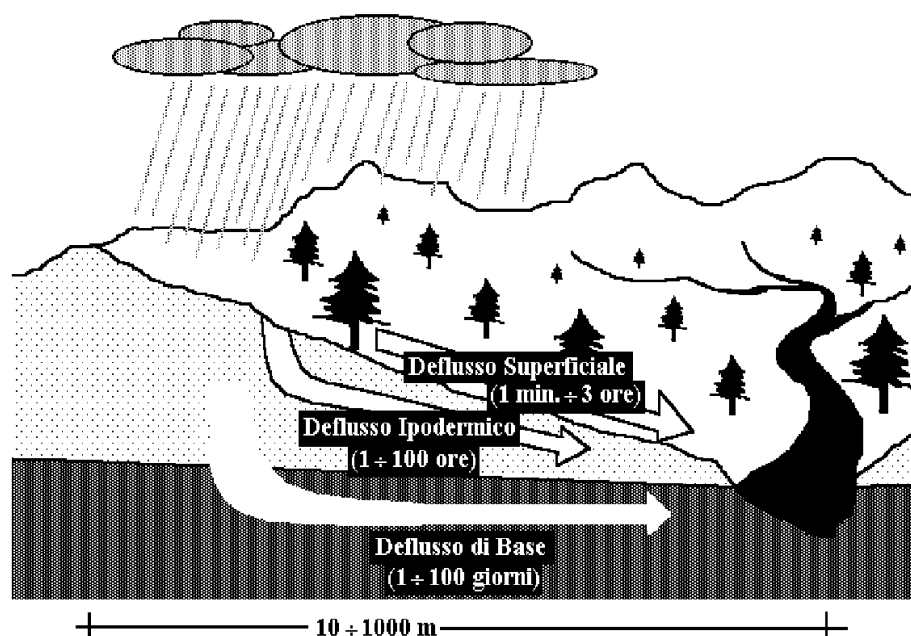


Fig. 9.1 – deflusso di base, deflusso ipodermico, ruscellamento

L'acqua di deflusso ipodermico non dovrebbe essere eccessiva stante la generalmente poca profondità delle falde acquifere e il non eccessivo spessore dei suoli; forse questa quota è stata compresa nelle misure di portata se esse sono state fatte quando il deflusso ipodermico non era

cessato, ma questa è un'incognita della calibrazione/validazione del modello. Resta il fatto che le misure sono state effettuate lontano da eventi precipitativi.

9.1.2 – La misura delle portate

Le misure sono state realizzate secondo le linee guida della norma UNI EN ISO 748 dell'aprile 2008. La portata di un corso d'acqua (Q) è definita da:

$Q = V_m \cdot S$	equazione 9.1
-------------------	---------------

Dove:

Q = portata del corso d'acqua (m³/secondo)

V_m = velocità media della sezione (m/s)

S = area della sezione (m²)

All'interno della sezione la velocità assume differenti valori (fig. 9.2) con valori massimi appena sotto la superficie e lontano dalle sponde e dal fondo; i valori minimi infatti sono di solito presso i bordi per effetto dell'attrito dei bordi stessi. Si può anche distinguere tra flusso laminare o turbolento in funzione della velocità e dell'attrito ma è un tema che non verrà trattato in questa sede. Non di rado il flusso del corso d'acqua non presenta maggiore velocità al centro ma più verso la destra o la sinistra idrografica (fig. 9.3); nel bacino SMA è stato un caso frequente, il flusso seguiva molto la destra idrografica, finché forti precipitazioni ed eventi di piena hanno fatto cambiare questa caratteristica e attualmente segue il centro della sezione. Le forti piene hanno l'effetto anche di cambiare la geometria del fondale naturale (invece se cementificato non cambia) e di conseguenza rende necessarie nuove misure per tarare la curva di deflusso (sez. 9.4.1).

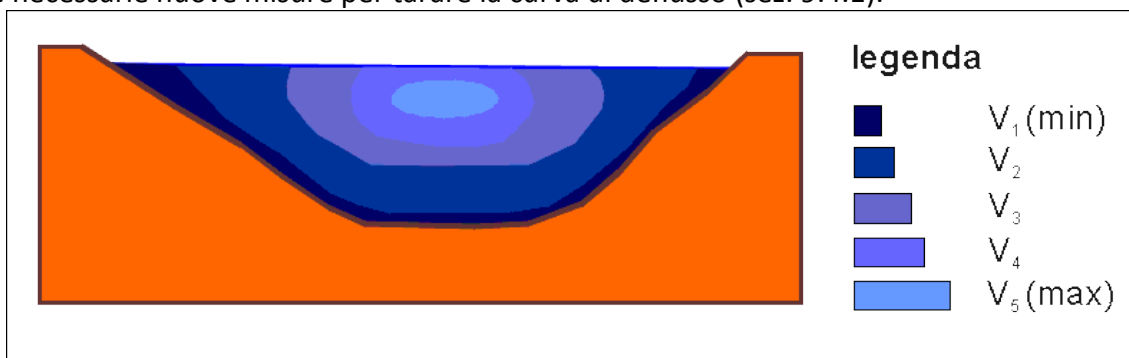


Fig. 9.2 – sezione di un corso d'acqua con differenti velocità dell'acqua

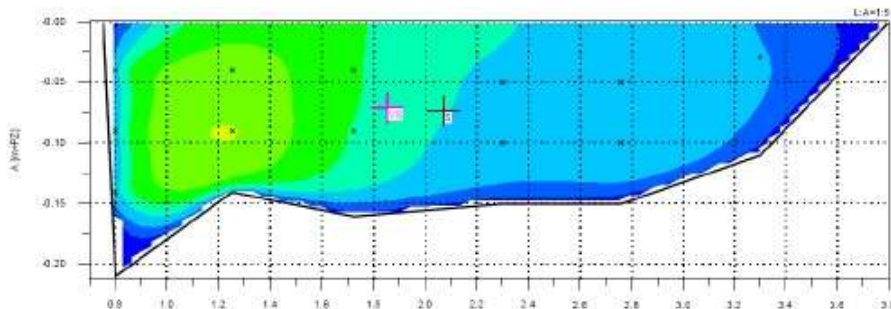


Fig. 9.3 – il flusso dell'acqua presenta una maggiore velocità in sinistra idrografica (supponendo che il flusso "entri" nella pagina)

Le misure si effettuano suddividendo la sezione in tante sotto-sezioni ed effettuando una misura di velocità e una di profondità per ogni sottosezione (fig. 9.4) oppure occorre effettuare le misure nei bordi delle sotto-sezioni e quindi fare la media per trovare il valore di velocità e di profondità della sotto-sezione compresa tra le misure: è questo il “mean section method” della norma UNI EN ISO 748:2008 (fig. 9.5)

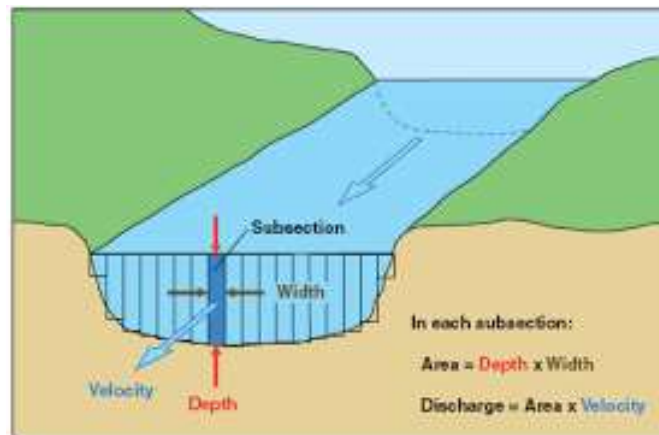


Fig. 9.4 – la misura della portata come somma delle portate di ciascuna sotto-sezione. Per ogni sotto-sezione si misura la velocità media e la profondità media e si ottiene la portata della sotto-sezione

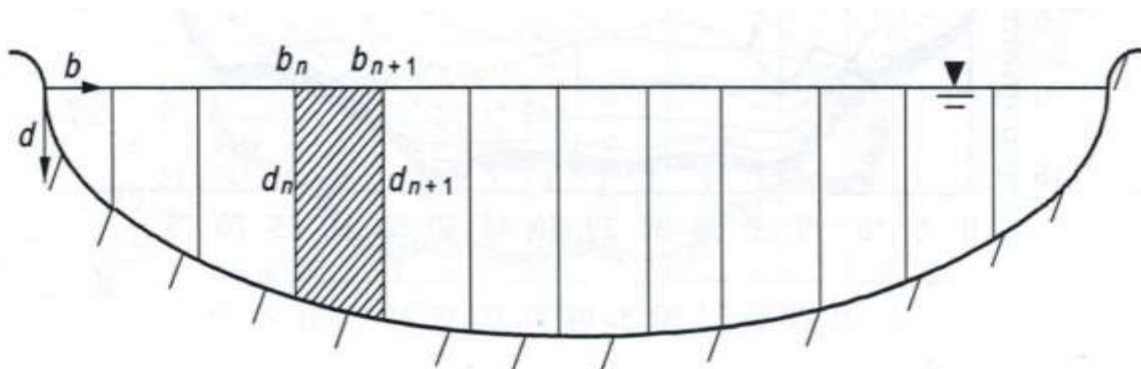


Fig. 9.5 – la misura della portata come somma delle portate di ciascuna sotto-sezione (mean section method UNI EN ISO 748:2008). Le sotto-sezioni sono comprese tra due misure di velocità e profondità e i valori attribuiti sono quelli medi

La formula per il calcolo della portata nella sottosezione è il seguente:

$$Q = (b_{n+1}-b_n) \cdot [(d_{n+1}-d_n)/2] \cdot [(V_{n+1}-V_n)/2]$$

equazione 9.2

Dove V = velocità media in ogni verticale. Per gli altri termini vedere fig. 9.5.

A seconda della velocità dell'acqua e della profondità della sotto-sezione ogni sotto-sezione contribuisce in modo diverso alla portata del corso d'acqua: la fig. 9.6 riporta quanto ha contribuito ogni sotto-sezione alla portata globale per una misura effettuata il 4 dicembre 2013 (portata totale = 317 litri/secondo). La sottosezione che ha maggiore portata ha un mix di *larghezza sezione/velocità media del flusso* maggiore rispetto alle altre (essendo la larghezza delle sottosezioni omogenee e le profondità quasi comparabili, è la velocità del flusso che fa la differenza e quindi il grafico può essere anche visto come una indicazione delle velocità).

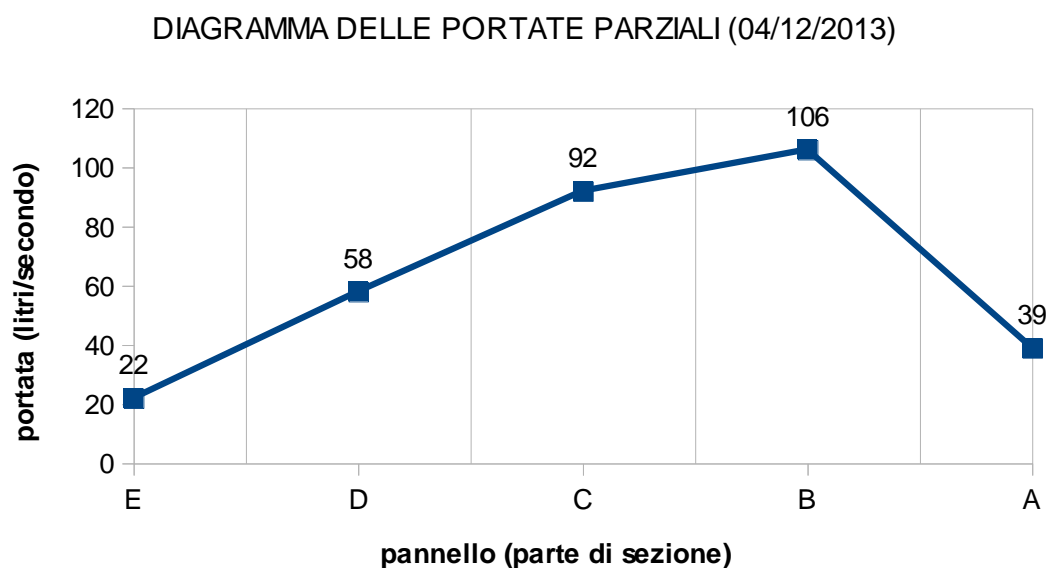


Fig. 9.6 - distribuzione delle portate parziali nella sezione. Ogni valore è la portata media che fluisce nella corrispondente parte di sezione.

9.1.3 – Due modalità di misurazione della velocità: con mulinello e con galleggiante

Dal giugno 2012 al marzo 2016 sono state effettuate misure solo con galleggianti; le misure al Fiume Metauro sono iniziate nell'agosto 2015. Dal marzo 2016 l'università si è dotata di un micro-mulinello idrometrico corr-tek modello OTT C2 (fig. 9.7): è dotato di asta graduata, contro-asta che permette il movimento del mulinello alle differenti profondità, corpo del mulinello con elica n°3 (range di velocità 3,5 cm/s – 4 m/s), contatore digitale associato alla visualizzazione della velocità in m/s.

A partire dal marzo 2016 le misurazioni di velocità sono state effettuate in doppia modalità, galleggiante e mulinello, anche per trovare relazioni idrauliche utili a facilitare la misura in fase di piena (sez. 9.5). Le misure hanno avuto cadenza settimanale fino a gennaio 2017, poi mensile (e proseguono tutt'ora). Sono state effettuate nello stesso giorno sia al SMA che al Metauro per una migliore comparazione tra i due bacini.



Fig. 9.7 – micro-mulinello idrometrico OTTC2 corrtex utilizzato per le misure

Con i **galleggianti** (pezzi di legno, foglie o quant'altro) vengono effettuate, in ogni sezione, 3 misure per il SMA e 3-5 misure al Metauro. Quindi la sezione viene divisa in un numero di sotto-sezioni pari al numero di misure +1.

La velocità media della verticale, con i galleggianti, si ricava moltiplicando la velocità superficiale per un coefficiente K_p variabile da 0,84 (stabilito in questo lavoro per livelli <30cm, in cui l'attrito del fondo è più rilevante) a 0,9 (per livelli >60cm); il valore di 0,87 è stato assegnato a valori tra 30 e 60 cm di profondità. Questo valore è sovrastimato per il Metauro mentre è abbastanza corretto per il Santa Maria degli Angeli.

Vengono poi poste delle correzioni per le velocità ai margini della sezione. Nel caso del SMA a volte la sezione non è stata presa per intero poiché si vedeva che ai margini l'acqua era praticamente ferma (fig. 9.8): allora ai margini della sezione (che

Data	Livello (cm)	Sezione (cm)	Flusso	Tempo galleggiante (per percorrere 2m)	Tempo ruota (per 20 giri = 26,5 m)	Depuratore (tubi che scaricano)
Sinistra idrografica						
04/12/2013 ore 16:45	44	155		5,8	90	1 e un po'
	52			4,8		
	43			3,5		
	46			2,1		
	42			2,4		
	35					
Destra idrografica			livello rilevato a 50 cm dalla sponda dx: 39 cm			

Fig. 9.8 – esempio di rilevamento dei parametri per la misura della portata alla sezione di chiusura del bacino Santa Maria degli Angeli (04 dicembre 2013). Larghezza totale sezione = 220 cm

non corrisponde col bordo) si è posta una velocità pari a 1/3 della velocità più vicina. In caso di sezione intera (in fase di morbida/piena) il rapporto è di 1/10 (il limite sezione corrisponde col bordo). Le fig. 9.9 e 9.10 riportano la schematizzazione dell'alveo della sezione di chiusura del bacino SMA (a Bivio Borzaga) e l'effettivo profilo, solo della parte sommersa, relativa alla misura della fig. 9.8. La fig. 9.10 riporta anche la sezione rilevata (in rosso) che è minore di quella intera: si nota come ai margini la velocità sia assunta pari a 1/3 della velocità più prossima mentre, sempre ai margini, la

profondità della sezione è assunta essere 1/2 della profondità adiacente. Questo schema ha dimostrato una buona validità se confrontato con le portate rilevate con mulinello, certamente più affidabili.

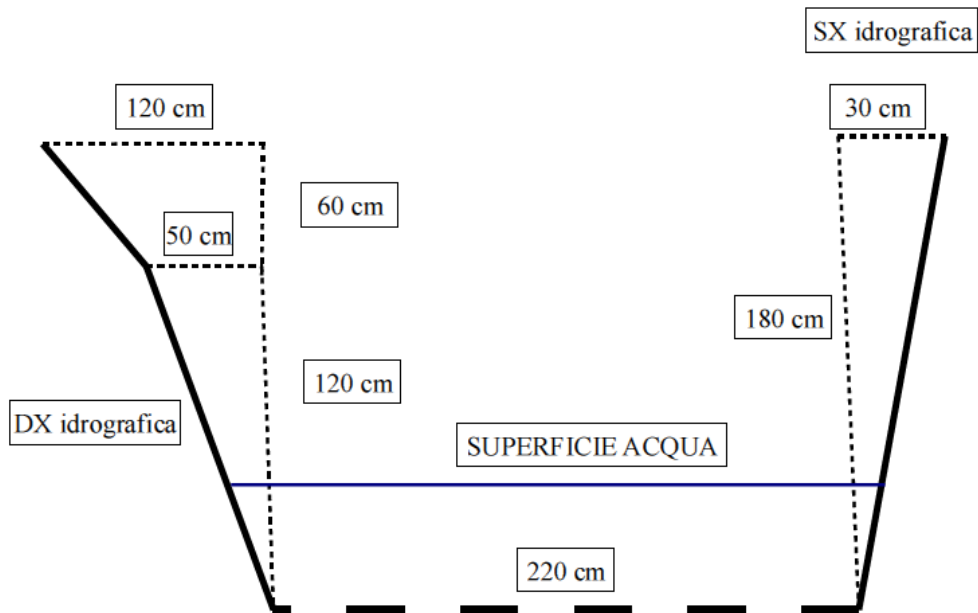


Fig. 9.9 – schematizzazione dell'alveo del Fosso Santa Maria degli Angeli a Bivio Borzaga. Il fondale è tratteggiato poiché è variabile nel tempo per effetto di piene

Dalla fig. 9.9 appare chiaro che la curva di deflusso (fig. 9.17), che lega le portate ai livelli, ha un *break-point* sopra 120 cm quando il fosso esonda.

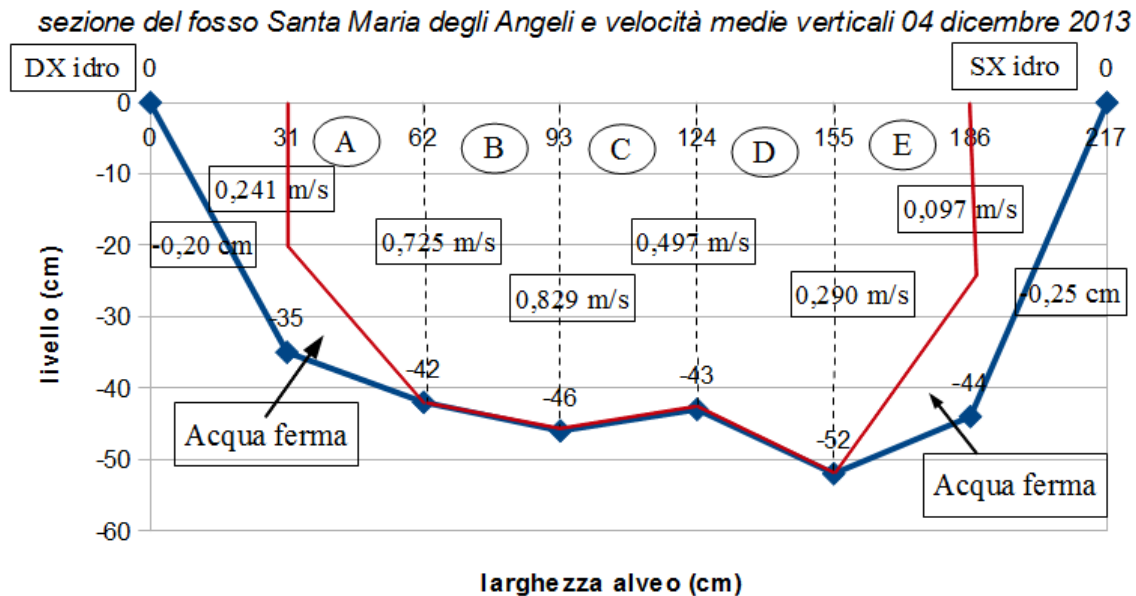


Fig. 9.10 – sezione reale (in blu) e modellata (in rosso) per la misura della portata con galleggianti del 04/12/2013. La portata totale è la somma delle portate delle sotto-sezioni

È importante trovare un buon sistema di misurazione con galleggiante poiché in un fosso a bassa portata come il SMA spesso non è possibile usare il mulinello per le basse velocità. Inoltre il mulinello è ovviamente inutilizzabile in fase di piena perché non si può entrare in acqua. Quando la larghezza della sezione è intera si utilizza la sezione in blu e ai margini il livello è 0 e la velocità 1/10 della velocità adiacente. Per il Metauro si è sempre adottata quest'ultima tecnica poiché l'acqua presenta sempre una velocità differente da zero anche ai margini.

Con il **mulinello** la misurazione è certamente più precisa e infatti è stata trovata una correlazione tra portate misurate con mulinello e portate misurate con galleggiante per correggere queste ultime e calcolare le giuste portate anche se il mulinello non era stato utilizzato (questo è importante soprattutto per il Metauro ove le misure con galleggiante si discostano di più, quasi certamente per la sovrastima del coefficiente K_p). Con il mulinello si è adottato il *one point method* della norma UNI EN ISO 748 che prevede, per la misura della velocità media della verticale, di effettuare la misura a 0,6 della profondità (se è 1 m allora si misura a 60 cm dalla superficie). Al fine di trovare relazioni idrauliche utili alla misurazione in fase di piena (sez. 9.5) si sono anche effettuate misure a livello sub-superficiale (fig. 9.11). Ogni misura dura 50 secondi, il tempo è regolabile con il contatore digitale.

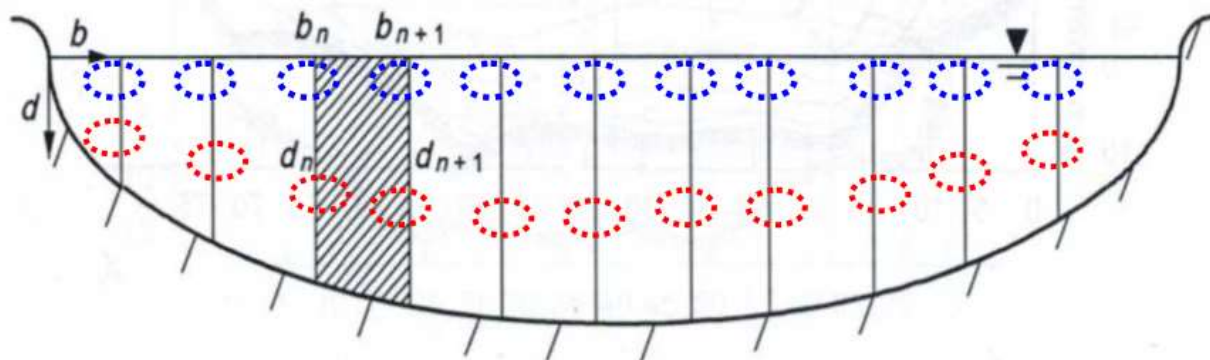


Fig. 9.11 – misure di velocità del mulinello, al 60% della profondità (in rosso) per la stima della velocità media, sub-superficiale (in blu) per ottenere relazioni idrauliche

9.1.4 – I siti di misura delle portate nei due bacini

La fig. 9.12 riporta le foto dei due siti di misura. A Bivio Borzaga era stata inizialmente posata in alveo una vasca per avere una sezione regolare e migliorare la stima dei deflussi, ma il difficile ancoraggio ha reso necessaria la sua rimozione allorché una piena l'ha spostata. È comunque interessante vedere come il flusso più veloce dell'acqua, che in quel periodo seguiva la destra idrografica (estate 2012), depositasse molto meno sedimento rispetto al flusso in sinistra che aveva una velocità più bassa.

Entrambi i siti hanno un fondale misto sabbia/pietre, con il Metauro avente una maggiore percentuale di pietre. La larghezza del fondo alveo del SMA è di 2,20 metri, del Metauro di 17,5 metri circa. Nel Metauro affiora il substrato roccioso (Marnoso Arenacea) in alcuni tratti di alveo al di sopra del quale poggia un deposito alluvionale; questo è di maggiore spessore ed estensione ed è coltivato in sinistra idrografica, meno esteso e boscato in destra idrografica (fig. 9.13). Poi dopo una scarpata anche in destra idrografica re-inizia una piana alluvionale. Il Fiume medio-alto Metauro poi si unisce al fiume Candigliano (di maggiore portata) qualche centinaio di metri più a valle, dopo il Ponte di Trajano. Nella foto di fig. 9.13 si nota la notevole quantità di acqua nel Candigliano ma è dovuto all'invaso di San Lazzaro poco più a valle. Anche il sito di misura di Bivio Borzaga (fig. 2.15)

presenta asimmetria geomorfologica ai lati, con un piccolo terrazzo pianeggiante in destra idrografica (lasciato a riposo) e un incolto degradante in sinistra idrografica.

Sito di misura a Bivio Borzaga (Fosso di Santa Maria degli Angeli)



Sito di misura a Calmazzo (Fiume medio-alto Metauro)



Fig. 9.12 – i due siti di misura delle portate, a Bivio Borzaga (per il Fosso di Santa Maria degli Angeli) e a Calmazzo (per il Fiume medio-alto Metauro). Le foto sono prese in periodo di magra



Fig. 9.13 – ubicazione del sito di misura delle portate per il medio-alto Metauro a Calmazzo (foto da Google Earth Pro, 09 luglio 2017)



Fig. 9.14 – ubicazione del sito di misura delle portate per il Fosso Santa Maria degli Angeli a Bivio Borzaga (foto da Google Earth Pro, 09 luglio 2017)

9.2– AFFLUSSI ESTERNI: DEPURATORE DELLE CONCE

È possibile l'ingresso di acqua dall'esterno all'interno del bacino SMA tramite strutture geologiche come il sovrascorrimento (si veda la fig. 2.16); tuttavia, per la difficoltà di individuazione e di quantificazione, tale possibile apporto non è stato considerato mentre lo è stato l'apporto del depuratore delle Conce. Il depuratore delle Conce, posto a sud di Urbino (presso una antica conceria, fig. 9.15), raccoglie parte delle acque chiare (da ruscellamento superficiale su strade) e scure (da scarichi in fogna) dell'abitato. Le acque scure, di derivazione acquedottistica, provengono da fuori bacino (dai monti della Dorsale Umbro Marchigiana, dai fiumi) e possono essere considerate nel bilancio in due modi:

1. si riportano nell'equazione del bilancio: in tal caso alle portate rilevate a Bivio Borzaga, che comprendono anche le acque del depuratore, non va tolto tale contributo;
2. si escludono dall'equazione di bilancio: in tal caso alle portate rilevate a Bivio Borzaga vanno sottratte le acque scaricate dal depuratore.

Si è scelto di optare per questo secondo modello anche al fine di confrontare i deflussi misurati con quelli calcolati (sez. 9.3.1).

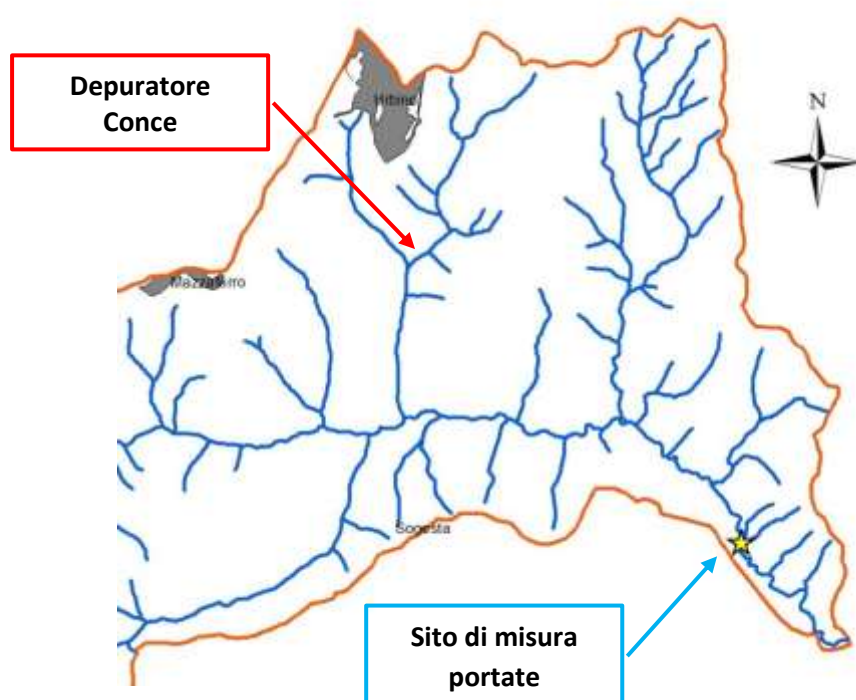


Fig. 9.15 – Ubicazione del depuratore delle Conce, attraverso cui passa acqua proveniente da fuori bacino

Come scritto il depuratore raccoglie sia le acque piovane che le acque di scarico ma quelle piovane sono già contabilizzate nelle precipitazioni (ricadono all'interno del bacino) e quindi si è reso necessario quantificare solamente lo scarico delle acque nere; occorre sottolineare che il depuratore non ha rilevazione della portata in uscita. Lo scarico del depuratore dista circa 3,8

chilometri dalla stazione di rilevamento di Bivio Borzaga; inizialmente ad ogni rilevazione della portata è corrisposto un sopralluogo al depuratore per cercare di comprendere la regolarità degli scarichi (in fig. 9.8 tale dato è riportato). Il depuratore scarica con 4 tubi di cui uno scarica in continuo; quando piove molto il depuratore si sovraccarica e aumentano i tubi scaricanti e a volte ci vogliono alcuni giorni per smaltire l'eccesso di acqua.

Sono state effettuate due misure di portata del depuratore e i valori registrati sono stati di 10 e 13 litri/secondo. Considerando la presenza ipotizzata di utenti (residenti, studenti, turisti) si è ipotizzato uno scarico di 12 l/s nei mesi non estivi, 8 l/s nei mesi estivi (luglio-agosto), 10l/s in quelli intermedi (giugno-settembre). Cercando di ipotizzare la perdita per infiltrazione ed evaporazione lungo il percorso si sono tolti, 2l/s nei mesi non estivi, 3 l/s in quelli estivi, 4 l/s in quelli estivi. In definitiva si sono sottratti questi valori dalle portate misurate:

10 l/s in: gennaio, febbraio, marzo, aprile, maggio

10 l/s in: ottobre, novembre, dicembre

7 l/s in: giugno, settembre

4 l/s in: luglio, agosto

Senza il contributo del depuratore il Fosso probabilmente si asciugherebbe nei mesi caratterizzati da forte siccità.

9.3 – CALCOLO DEI DEFLUSSI

9.3.1 – Calcolo dei deflussi di base a partire dalle misure di portata

Le misure delle portate, espresse in m³/secondo o in litri/secondo, non possono essere inserite nell'equazione di bilancio ma vanno convertite in mm: per fare questo a livello mensile basta utilizzare la seguente equazione:

$D = (Q \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot n) / A$	equazione 9.3
--	---------------

ove:

D = deflusso (m)

Q = portata media mensile (m³/s)

n = numero di giorni nel mese

A = area proiettata del bacino (in m²)

Si ottengono così i metri di acqua defluiti in un mese che, moltiplicati x 1000, forniscono i mm da inserire in bilancio.

A livello annuale si hanno i seguenti valori di deflusso con le corrispondenti precipitazioni (Pa):

Anno	Precipitazioni (Pa)	Ruscellamento	Deflusso misurato (mm)
2013	1022	144	254
2014	1067	140	323
2015	851	110	229
2016	834	71	131

Tab. 9.1 – valori annuali dei deflussi nel bacino Santa Maria degli Angeli

L'anno 2014 ha presentato valori di deflusso molto elevati, soprattutto nei primi mesi dell'anno, e questo è giustificato dalla percolazione profonda degli ultimi mesi dell'anno precedente, come sarà descritto nel capitolo 10. Per contro il 2016 ha presentato un deflusso molto basso; c'è una buona concordanza con le precipitazioni.

9.3.2 – Confronto dei deflussi annuali misurati con il deflusso calcolato con il metodo di Kennessey

L'analisi dei deflussi mensili sono affrontati nel cap. 10 quando vengono messi in relazione con altri parametri del bilancio. In questa sezione viene calcolato il deflusso SMA 2016 con il metodo di Kennessey per controllare se i valori di deflusso misurato sono compatibili con questo modello utilizzato da innumerevoli anni.

Per bacini privi di stazione di misura il deflusso può essere calcolato col metodo di Kennessey. Kennessey (1930) calcolò il coefficiente di deflusso ($Cd = D/P$, ove D = deflusso e P = precipitazioni) di numerosi bacini dell'Ungheria e trovò che esso dipende essenzialmente da tre fattori, gli stessi che favoriscono il ruscellamento: copertura vegetale, permeabilità delle rocce e acclività. Il Cd di Kennessey viene quindi anche utilizzato per il calcolo del ruscellamento annuale ma, come visto, il deflusso consta anche del deflusso di base: se Kennessey per la calibrazione ha misurato le portate alla chiusura dei bacini di cui ha calcolato il Cd allora il Cd comprende anche il deflusso di base (questo però non è ben chiaro).

Per applicare il metodo di Kennessey occorre seguire i seguenti passi:

- si realizzano mappe tematiche del territorio relative ai fattori di acclività, uso del suolo e permeabilità;
- in ogni mappa tematica il fattore viene diviso in diverse classi: ad esempio per l'uso del suolo occorre capire quanta superficie del territorio è boscata, quanta è coperta da pascoli ecc.; per l'acclività quanta superficie ha pendenza < 3,5%, quanta tra 3,5 e 10% ecc.;
- per ogni classe ci possono essere tre possibili valori: quello corretto è quello corrispondente alla classificazione climatica del bacino secondo l'indice di aridità medio annuo (Ia);
- col sistema della media ponderata si ottengono i Cd relativi ai tre fattori; sommando i 3 Cd si ottiene il Cd totale del bacino.

Occorre avere chiaro che il Cd calcolato con la tabella non tiene conto delle precipitazioni e questo può portare a una sottostima del deflusso in anni molto piovosi: il coefficiente, a parità di indice di aridità e di tutti gli altri fattori del bacino, in anni piovosi dovrebbe essere maggiore rispetto a quello calcolato con la tabella poiché i suoli sono più saturi, il ruscellamento è maggiore, le falde hanno alti livelli e contribuiscono maggiormente al deflusso di base, ecc. .

La tabella 9.2 è dovuta a Tardi e Vittorini (1977) che hanno modificato quella di Kennessey per adattarla alla situazione italiana.

FATTORE	COEFFICIENTI		
	la < 25	25 < la < 40	la > 40
Acclività			
1 - maggiore del 35%	0,22	0,26	0,3
2 - tra il 10% e il 35%	0,12	0,16	0,2
3 - tra il 3,5% e il 10%	0,01	0,03	0,05
4 - minore del 3,5%	0,00	0,01	0,03
Copertura vegetale			
1 - roccia nuda	0,26	0,28	0,3
2 - pascoli	0,17	0,21	0,25
3 - terra coltivata, bosco	0,07	0,11	0,16
4 - bosco d'alto fusto	0,03	0,04	0,05
Permeabilità			
1 - molto scarsa	0,21	0,26	0,3
2 - scarsa	0,16	0,21	0,26
3 - media	0,12	0,16	0,2
4 - medio-alta	0,06	0,08	0,1
5 - elevata	0,03	0,04	0,05

Tab. 9.2– coefficienti per il calcolo del Cd di Kennessey (da Kennessey, 1930, e modificato da Tardi e Vittorini, 1977)

L'indice di aridità si calcola con la seguente equazione:

$la = [P/(Tm+10) + (12p/t)]/2$	equazione 9.4
--------------------------------	---------------

n cui:

P = precipitazione annua (mm)

Tm = temperatura media annua (°C)

p = precipitazione del mese più secco (°C)

t = temperatura del mese più secco (non del più caldo ma ove ci sono meno precipitazioni, °C)

Il Cd varia di anno in anno poiché varia l'indice di aridità, mentre le aree delle classi dei fattori della tabella 9.2 sono circa costanti.

Per la permeabilità si è seguito un criterio simile al quello utilizzato per la definizione dei *soil groups* del *curve number* (tab. 7.9):

substrato/copertura	Classi permeabilità Kennessey
SCHLIER	molto scarsa
DEPOSITI SU SCHLIER	scarsa
MARNOSO ARENACEA	scarsa
DEPOSITI SU MA	media
BISCIARO	media
DEPOSITI SU BISCIARO	medio-alta
ALLUVIONI E CONOIDI	elevata

Tab. 9.3 – attribuzione delle aree del bacino SMa alle classi di permeabilità di Kennessey

Per il 2016 nel bacino di Santa Maria degli Angeli l'indice di aridità ha avuto valore di 23,4, quindi si utilizzano i valori della prima colonna della tab. 9.2. Applicando il modello (tab. 9.5) ne deriva che il Cd per il 2015 è **0,352** che moltiplicati per il valore di precipitazioni (834 mm, tab. 9.1) danno un deflusso di circa **294** mm, molto maggiore del deflusso misurato. È maggiore anche della somma di deflusso misurato (131) e ruscellamento (71), pari a 202 mm. Se applichiamo tale Cd anche agli altri anni ne derivano i seguenti valori:

Anno	Precipitazioni (Pa)	Ruscellamento (RO)	Deflusso misurato (DM)	Deflusso Kennessey	Somma RO+DM
2013	1022	144	254	360	398
2014	1067	140	323	376	463
2015	851	110	229	300	339
2016	834	71	131	294	202

Tab. 9.4 – applicazione del Cd Kennessey 2016 (=0,352) a tutti gli anni di bilancio

Si nota che solo nel 2014 il deflusso calcolato con Kennessey si avvicina al deflusso misurato, negli altri anni si avvicina alla somma deflusso misurato + ruscellamento ma non c'è mai una perfetta corrispondenza.

Anche per il bacino del medio-alto Metauro si è calcolato il Cd 2016 utilizzando il *Corine land Cover* come informazione di uso del suolo (fig. 2.26) e la mappa di vulnerabilità/permeabilità per le attribuzioni delle classi di permeabilità (fig. 2.27). L'indice di aridità è risultato essere maggiore: **28,9**; questo ha comportato l'uso dei valori della seconda colonna della tabella 9.2 e un valore maggiore di Cd che, per il 2016, è risultato essere di **0,473**. Date le precipitazioni 2016 (Pa) di 941 mm ne deriva un deflusso calcolato di 445mm contro i 298mm misurati con le portate. Anche in questo caso non c'è corrispondenza e forse il Cd consente di stimare il deflusso di base + ruscellamento (che non è stato calcolato per il medio-alto Metauro). Occorre dire che ci sono incertezze nella stima delle precipitazioni e delle temperature (stimate con le fasce altimetriche, un nuovo metodo) e quindi potrebbe avere portato a una sovrastima dell'indice di aridità e quindi a valori del Cd maggiori, ma questo è ancora da verificare.

acclività				
Oltre 35%	481,6	0,4	0,22	0,081
Tra 10 e 35%	727,9	0,6	0,12	0,067
Tra 3,5 e 10% (13,6 ettari)	14,1	0,0	0,01	0,000
Tra 0 e 3,5% (85 ettari)	86,1	0,1	0	0,000
somma layers	1309,7	1		0,148 contributo tot. Acclività
copertura vegetale uso 2013				
	ha	coefficienti		
roccia nuda	90,5	0,069	0,26	0,018
pascoli	304	0,232	0,17	0,039
terra coltivata, bosco	459,5	0,351	0,07	0,025
bosco d'alto fusto	455	0,348	0,03	0,010
somma layers	1309,0	1		0,092 contributo tot. Copertura
permeabilità				
	ha			
molto scarsa	114	0,085	0,21	0,018
scarsa	404	0,299	0,17	0,051
media	141	0,105	0,12	0,013
Medio-alta	665	0,493	0,06	0,030
elevata	25	0,018	0,03	0,001
somma layers	1348,4	1		0,111 contributo tot. Permeabilità
			coefficiente deflusso bacino	
			0,352	

Tab. 9.5 – calcolo del coefficiente di Kennessey per il 2016 nel bacino di Santa Maria degli Angeli. L'area totale delle classi di permeabilità è relativa al bacino intero ma le proporzioni sono circa le stesse del bacino ridotto.

9.4 – CONFRONTO TRA FOSSO SANTA MARIA DEGLI ANGELI E FIUME MEDIO-ALTO METAURO

9.4.1 – Misura delle portate

I grafici di fig. 9.16 e 9.17 riportano l'andamento delle portate nelle due sezioni di chiusura: il primo è relativo al periodo agosto 2015-dicembre 2016 in cui sono state effettuate misure settimanali e il secondo del periodo gennaio 2017-agosto 2017 in cui le misure sono proseguite a intervallo mensile. Dato che le misure di velocità sono state effettuate con mulinello-galleggiante, ma a volte solo con galleggiante poiché per eccessiva magra/forte piena il mulinello non era utilizzabile, le portate sono state corrette considerando solo le portate rilevate con galleggiante e corrette mediante la correlazione tra portate mulinello-portate galleggiante (in modo da riportare tutte le misure a come se fossero state effettuate da mulinello, più preciso dei galleggianti). La relazione utilizzata è una delle relazioni idrauliche calcolate (sez. 9.5).

I trend hanno una buona concordanza in entrambi i casi: ricordiamo che si tratta di portate relative al **deflusso di base** quindi non hanno una diretta correlazione (attraverso il ruscellamento) con le precipitazioni ma ne risentono in maniera indiretta attraverso l'innalzamento delle falde acquifere e probabilmente anche attraverso parte del deflusso ipodermico. Questo processo è più breve nel bacino SMA essendo più piccolo. Dall'analisi delle precipitazioni emerge comunque un'alta quota di precipitazioni in febbraio nel Metauro e in febbraio-marzo nel SMA, a dimostrare che una correlazione diretta c'è stata probabilmente attraverso l'innalzamento decisivo delle falde acquifere che avevano comunque già iniziato il percorso di risalita con le precipitazioni dei mesi precedenti (fig. 10.12). Per il SMA sarà analizzata anche la correlazione anche con la percolazione profonda ottenuta dal bilancio idrogeologico (cap. 10).

Dai grafici si nota la differente scala di portate: quelle del Metauro sono di due ordini di grandezza superiori; la tabella 9.5 riprende e amplia la tab.2.5 riportando anche alcune delle portate caratteristiche dei due bacini con le principali caratteristiche fisiografiche e di altro genere che hanno importanza nella determinazione dei deflussi.

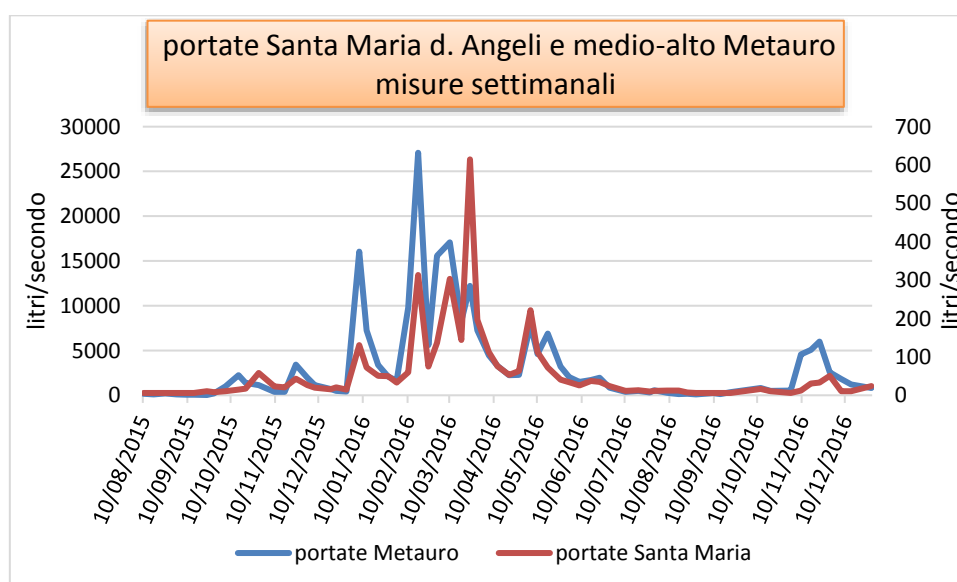


Fig. 9.16 – confronto tra le portate del Fosso Santa Maria degli Angeli e del medio-alto Fiume Metauro – misure settimanali da agosto 2015 a dicembre 2016

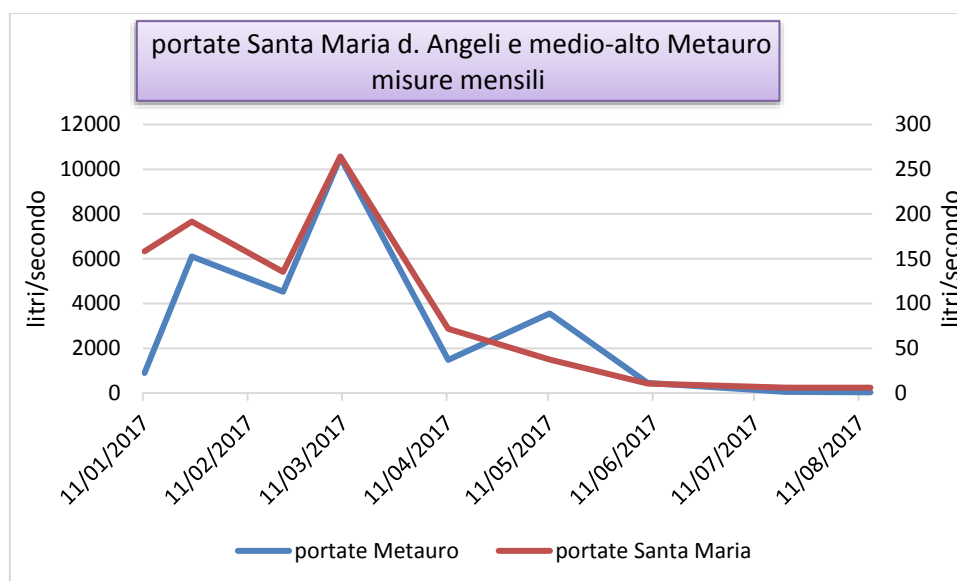


Fig. 9.17 – confronto tra le portate del Fosso Santa Maria degli Angeli e del medio-alto Fiume Metauro – misure mensili da gennaio 2017 ad agosto 2017

PARAMETRO	dimensione	Bacino Santa Maria degli Angeli	Bacino medio-alto Metauro
Portata massima	litri/secondo	615	27086
Portata media	litri/secondo	61	3243
Portata minima	litri/secondo	6	34
Superficie proiettata	km ²	13,097	377,3
Superficie reale	km ²	13,974	412,4
Coefficiente di acclività Ca (superf.reale/proiettata)	adimensionale	1,067	1,094
Quota media	metri s.l.m.	336	493
Pendenza media	%	32,613	37,240
Fascia altimetrica più estesa	metri (% sul totale area)	300-350* (28,5%)	350-400 (11,5%)
Classe di pendenza più rappresentata	gradi (% sul totale area)	20-30* (28,8%)	20-30 (18,5%)
Classe di esposizione più rappresentata	adimensionale (% sul tot area)	sud-est* (16%)	sud-est + est (13% + 13%)
Lunghezza dell'asta principale	km	6,5 (7,6*)	76,8
Ordine di Strahler	adimensionale	3	6
Tempo di corrivazione	ore	1,47	12,41
Uso del suolo principale (Corine land cover 2012)	adimensionale (% sul tot area)	Boschi a prevalenza di querce caducifoglie (33,3%)	Boschi a prevalenza di querce caducifoglie (19,3%)
Classe di permeabilità massima – più estesa	adimensionale (% sul tot area)	III B – II A (4,7%) – (28,8%)	III A – II A (0,6%) – (58,2%)

Tab. 9.5 – portate caratteristiche (periodo tra agosto 2015 e agosto 2017) e valori dei principali parametri che influenzano i deflussi nei due bacini di studio

Le portate medie risentono delle scarse precipitazioni del biennio 2015-2016 rispetto agli anni precedenti. Le portate massime sono quelle che divergono di più, e la differenza di superficie è sicuramente un elemento importante. Alcuni parametri giocano a favore di un maggiore ruscellamento nel bacino del Metauro: pendenza media e quota media più elevate, Ca maggiore; altri sono a favore di una maggiore infiltrazione: maggiore % di superfici boscate, una classe di permeabilità maggiore (ma non estesa). Le superfici boscate sono però calcolate con il Corine Land Cover per entrambi i bacini e non c'è un grande dettaglio.

9.4.1 – Curve di deflusso

In caso di piena la portata si può calcolare mediante la curva di deflusso che mette in relazione i livelli con le portate. Deve essere tarata con una serie di misure. Se il fondale o in generale la sezione cambia la curva va tarata nuovamente. Nella sez. 9.5 sono riportate relazioni idrauliche, calcolate dai dati delle misure delle portate, che possono ulteriormente facilitare la stima delle portate in fase di piena. Le misure di livello per le curve sono state prese di volta in volta ai margini della sezione. La fig. 9.18 riporta la curva relativa al bacino SMA da agosto 2015 ad agosto 2017. Nel sito di misura si è formato un piccolo invaso per cui la curva ha perso di affidabilità. È stata apportata una piccola correzione (sono stati tolti 40 cm dai livelli) ma il basso livello di R^2 denota la scarsa accuratezza.

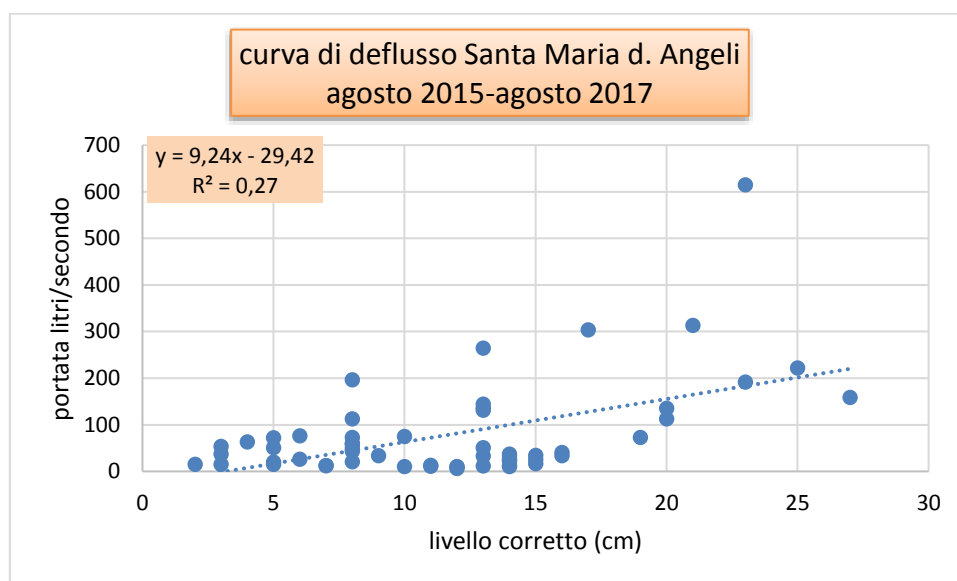


Fig. 9.18 – curva di deflusso (regressione lineare) livelli-portate per il SMA da agosto 2015 ad agosto 2017. I livelli sono stati diminuiti di 40 cm per evitare di considerare il piccolo invaso che si è creato

In questi 5 anni di misure (da giugno 2012) il fondale è cambiato più volte e le curve con esso. I primi anni, nel periodo di studio corrispondente alla tesi specialistica, la correlazione è stata maggiore: si riporta la curva del primo anno e mezzo a titolo esemplificativo (fig. 9.19). Durante quel primo periodo erano state ottenute ben 4 curve di deflusso, riportate in fig. 9.20; il grafico denota la differente portata che si ottiene dalle curve per il medesimo livello, espressione della morfologia dell'alveo. La fig. 9.21 riporta le 4 curve in scala logaritmica: a pendenza maggiore corrisponde un incremento di portata maggiore.

CURVA POTENZIALE PORTATA -ALTEZZA IDROMETRICA
intero periodo di rilevamento (09/06/2012-13/01/2014)

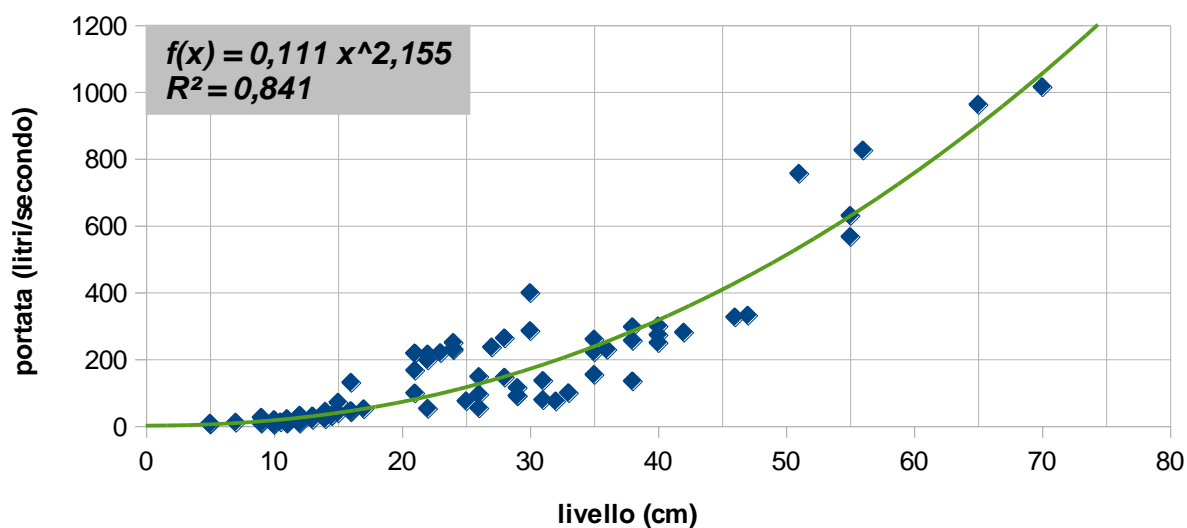


Fig. 9.19 – curva di deflusso (regressione potenziale) livelli-portate per il SMA da giugno 2012 a gennaio 2014 (intero periodo di tesi di laurea specialistica)

CONFRONTO TRA CURVE POTENZIALI PORTATA - ALTEZZA IDROMETRICA

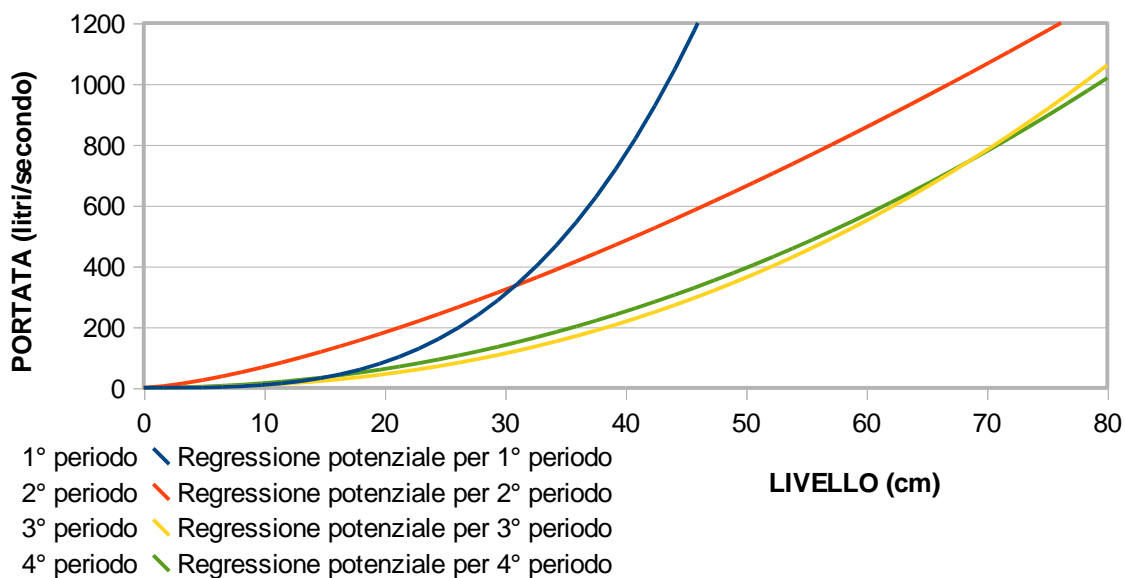


Fig. 9.20 – curve di deflusso (regressione esponenziale) livelli-portate per il SMA in 4 periodi differenti da giugno 2012 a gennaio 2014. Si noti per ogni curva il differente valore di portata corrispondente al medesimo livello (es. livello 40 cm, linea tratteggiata).

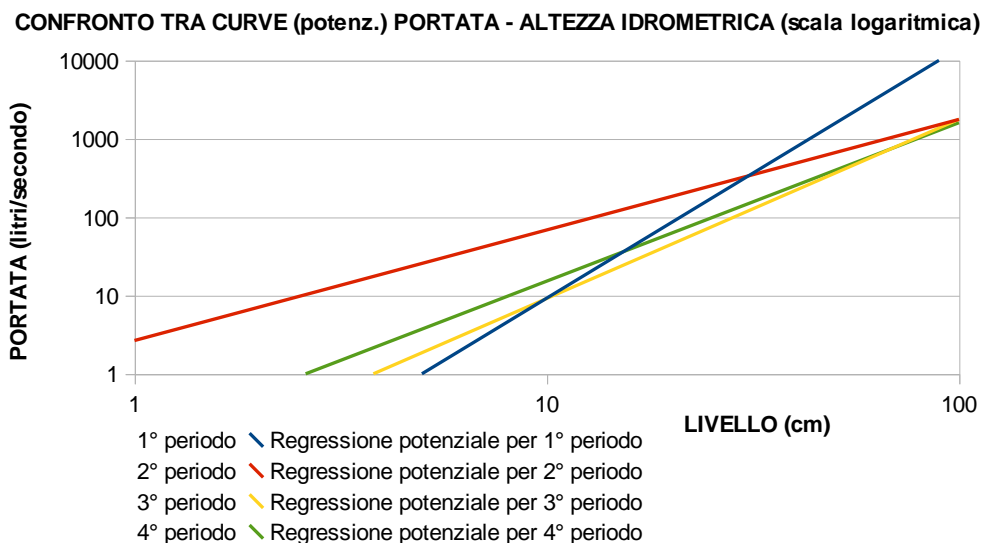


Fig. 9.21 – curve di deflusso livelli-portate per il SMA in 4 periodi differenti da giugno 2012 a gennaio 2014, espresse in scala logaritmica. A pendenza maggiore corrisponde, per un dato incremento di livello, un aumento di portata maggiore.

Per quanto riguarda il Fiume Metauro la validità della curva di deflusso viene minata dall'invaso artificiale di San Lazzaro, posto circa 2500 metri più a valle. Infatti se si decide di riempire l'invaso allora il livello sale anche se la portata non è aumentata. Per questo motivo si sono fatte due misure, una presso il ponte di Trajano, più prossimo all'invaso, e l'altro circa 200 m più a monte nel sito di misura delle portate. La seconda curva ha una maggiore affidabilità (come denota il valore di R^2); in entrambe le curve il grande numero di puntini (dati) in prossimità dell'ascissa è causa proprio di questo "effetto invaso", e nella seconda curva è meno evidente. Entrambe sono regressioni lineari che approssimano meglio la correlazione livelli-portate.

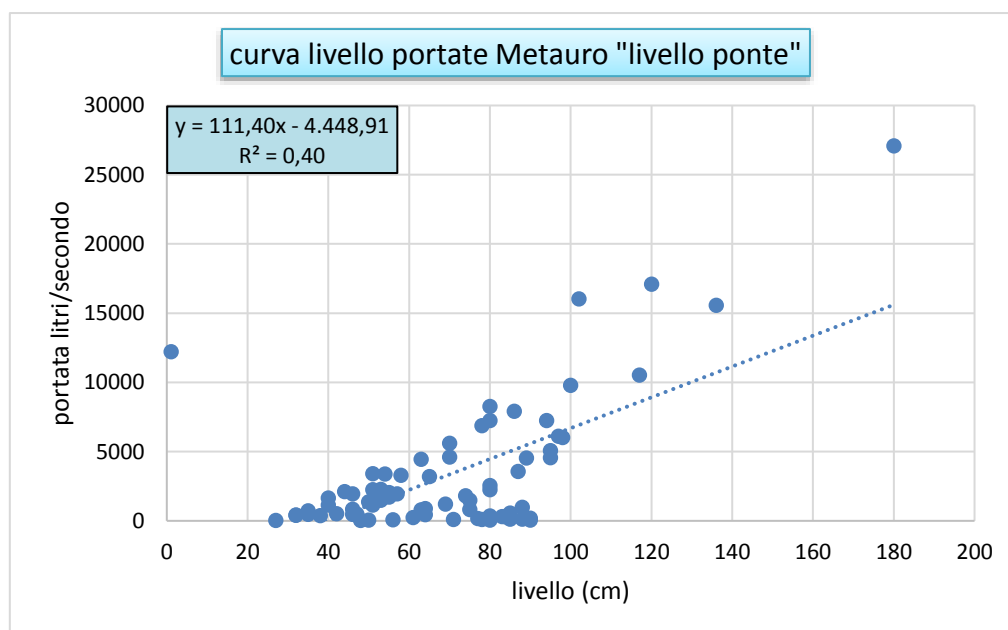


Fig. 9.22 – curva livello-portate (regressione lineare) per il Fiume Metauro a livello del ponte di Trajano

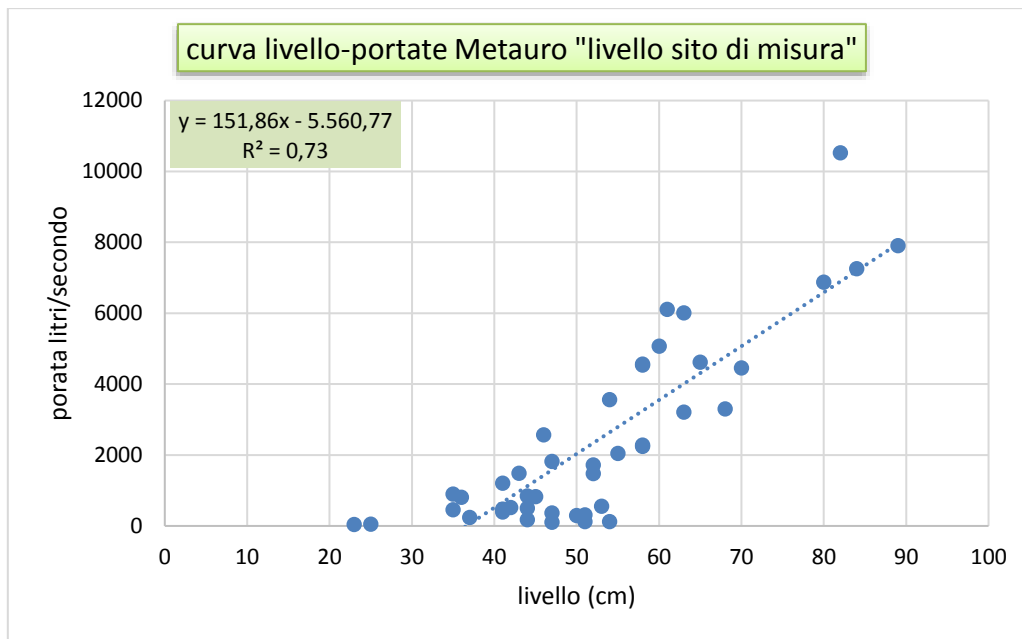


Fig. 9.23 – curva livello-portate (regressione lineare) per il Fiume Metauro a livello del sito di misura

9.5 – LE RELAZIONI IDRAULICHE

Quando il fiume è in piena è la misura della portata non si può effettuare: la massima velocità (sub-superficiale) che si è riusciti a misurare in acqua è di circa 1,2 m/s (il giorno 10/03/2017) e non si pensa sia possibile stare in acqua per velocità più elevate, la velocità del flusso e la spinta di Archimede tendono a fare perdere contatto con il fondale con grave rischio per la persona oltre che perdita della strumentazione. La profondità era di 90 cm.

In condizioni di piena la portata viene ottenuta dalla sola misura del livello mediante la citata curva di deflusso. Se il fondale è stabile (ad esempio con sponde e fondale in cemento) la curva dovrebbe durare nel tempo; se non è stabile va tarata nuovamente dopo qualche anno, altrimenti perde di affidabilità. Se si dispone di una relazione che lega la velocità superficiale, misurata con galleggianti o con radar (fig. 9.22), alla velocità media del profilo si può avere una informazione supplementare per capire se la portata fornita dalla curva di deflusso sia corretta.

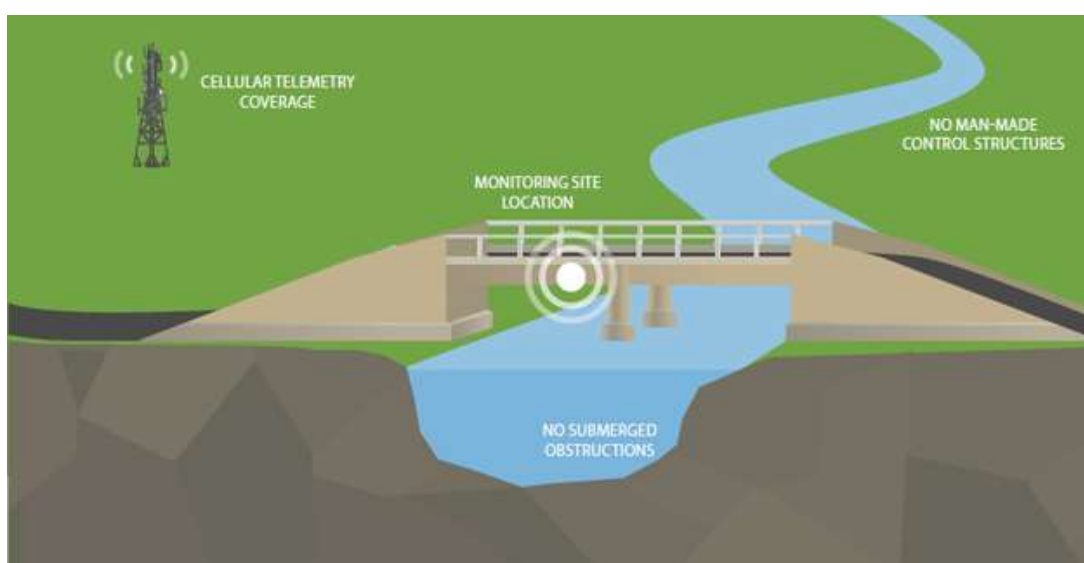


Fig. 9.23 – sistema per la misura della velocità superficiale dell'acqua con radar posizionato su un ponte

La relazione idraulica di maggiore interesse è la correlazione tra velocità massima superficiale e velocità media del flusso; la relazione per i due bacini è la seguente:

Relazione	Periodo di misure	Bacino
$V_{media_m} = 0,741V_{maxgall}-0,034$	maggio 2016-agosto 2017	Santa Maria degli Angeli
$V_{media_m} = 0,542*V_{maxgall}-0,010$	aprile 2016-agosto 2017	Medio-alto Metauro

Equazioni 9.5 e 9.6

ove:

Vmedia_m = velocità media del flusso nella sezione (m/s). “m” sta per “mulinello” poiché tutto è rapportato alla velocità misurata con mulinello, ovvero la misura calcolata è come se fosse ottenuta

con mulinello anche se si sono utilizzati i galleggianti per la velocità superficiale (che corrisponde alla velocità rilevata da radar)

V_{maxgall} = velocità massima del flusso superficiale (m/s), misurata con galleggiante, e corrisponde alla velocità che si rileverebbe con radar.

Le relazioni differiscono molto, e ci si aspetterebbe che avendo una sezione più piccola e un maggiore effetto di attrito delle sponde il Fosso Santa Maria debba avere una maggiore differenza tra velocità massima superficiale e velocità media del flusso. Occorre dire che per questa relazione sono state effettuate solo 15 misure e c'è bisogno di una maggiore taratura.

Si sono trovate ulteriori relazioni, le quali possono essere divise in due tipologie:

- 1) equazioni di portata: servono per mettere in relazione le portate misurate con il mulinello alle portate misurate con galleggiante. Sono molto utili poiché a volte, soprattutto nel Fosso SMA, il mulinello non è utilizzabile (acqua troppo lenta o corso d'acqua in piena);
- 2) equazioni di velocità: sono utili per i motivi sopra citati.

Tutte le relazioni sono sito-specifiche e andrebbero applicate ad altri siti solo con estrema attenzione; però possono andare ad incrementare il bagaglio di informazioni su questa tematica ancora poco studiata.

Le tabelle 9.6 e 9.7 riportano le relazioni idrauliche di portata e di velocità.

equazioni di PORTATA Santa Maria degli Angeli		
PM < 50 l/s	con %	R ²
50 < PM < 100 l/s	PM = 0,72*PG + 12,08	0,50
100 < PM < 200	PM = 0,81*PG + 9,79	0,79
200 < PM < 610	PM = 1,12*PG - 36,66	0,98
PM > 610	con %	
unica equazione	PM = 0,96PG - 2,645	media 0,97 e 1
equazioni di PORTATA Metauro		
		R ²
range 1 = portata gall < 1000 l/s	PM = 0,0005PG + 0,2892PG + 13,925	0,915
range 2 = port gall tra 1000 e 10000	PM = 0,6842PG + 100,12	0,991
range 3 = port gall > 9999	PM = 0,5635PG + 1032,0	0,932

Tab. 9.6 – equazioni di portata per i due bacini

PM = portata misurata con velocità rilevata mediante mulinello idrometrico

PG = portata misurata con velocità rilevata mediante galleggianti

EQUAZIONI DI VELOCITA'

medio e alto Metauro	relazione idraulica di velocità	periodo di misure	R ²
	$V_{media_g} = 0,809V_{maxgall} - 0,027$	aprile 2016-agosto 2017	0,989
	$V_{media_m} = 0,542V_{maxgall} - 0,010$	aprile 2016-agosto 2017	0,991
	$V_{media_m} = 0,700V_{maxmul} - 0,034$	maggio 2016-agosto 2017	0,991
	$V_{maxmul_06} = 0,836V_{maxmul} - 0,001$	maggio 2016-agosto 2017	0,996
	$V_{mul_06} = 0,843V_{mul} - 0,005$	maggio 2016-agosto 2017	0,982

*numero di verticali, circa 20 per ogni misura di portata (il numero varia in base alla larghezza dell'alveo)

Santa Maria degli Angeli	relazione idraulica di velocità	periodo di misure	R ²
totale	$V_{media_g} = 0,558 * V_{maxgall} + 0,014$	da agosto 2013 a maggio 2017	0,908
pre-08febbraio 2015	$V_{media_g} = 0,565 * V_{maxgall} - 0,001$	da agosto 2013 a febbraio 2015	0,871
post-08febbraio 2015	$V_{media_g} = 0,692 * V_{maxgall}$	da febbraio 2015 a maggio 2017	0,966
alte velocità ($V_{maxgall} > 0,7m/s$)	$V_{media_g} = 0,155 * 3,818^{\wedge} V_{maxgall}$	da agosto 2013 a maggio 2017	0,397
solo 2013	$V_{media_g} = 0,517 * V_{maxgall} + 0,015$	da agosto 2013 a maggio 2017	0,894
	$V_{media_m} = 0,741V_{maxgall} - 0,034$	maggio 2016-agosto 2017	0,978
	$V_{media_m} = 0,653V_{maxmul} - 0,010$	maggio 2016-agosto 2017	0,982
	$V_{maxmul_06} = 0,806V_{maxmul} - 0,003$	maggio 2016-agosto 2017	0,996
	$V_{mul_06} = 0,790V_{mul} - 0,002$	maggio 2016-agosto 2017	0,893

*numero di verticali, circa 8-9 per ogni misura di portata (il numero varia in base alla larghezza dell'alveo)

Legenda

V_{media_g} = velocità media del flusso ottenuta mediante calcolo della portata con galleggianti

V_{media_m} = velocità media del flusso ottenuta mediante calcolo della portata con mulinello

$V_{maxgall}$ = velocità massima superficiale rilevata utilizzando i galleggianti

V_{maxmul} = velocità massima (sub)superficiale rilevata utilizzando il mulinello idrometrico (la massima di tutte le velocità sub-superficiali di tutte le verticali)

V_{maxmul_06} = velocità massima a 0,6 depth rilevata utilizzando il mulinello idrometrico ((la massima di tutte le velocità 0,6 depth di tutte le verticali)

V_{mul} = velocità (sub)superficiale misurata su una verticale mediante mulinello idrometrico

V_{mul_06} = velocità a 0,6 depth misurata su una verticale mediante mulinello idrometrico

Tab. 9.7 – equazioni di velocità dei due bacini

CAPITOLO 10 – CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL BILANCIO CON ANALISI DEI RISULTATI

10.1– CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL BILANCIO

10.1.1 – Metodologia di calibrazione e validazione

Il bilancio idrogeologico su base fenologica, nei parametri e nella modellazione, è stato descritto nel capitolo 4; i parametri che in esso entrano sono stati descritti nel dettaglio nei capitoli successivi. La fig. 10.1 riprende la fig. 4.4 e descrive schematicamente il modello; non sono stati considerati la risalita capillare e l'irrigazione (quest'ultima non presente nel bacino). L'evapotraspirazione reale deriva dalla **evapotraspirazione massima colturale calcolata a livello di intero bacino**, mediante il calcolo del coefficiente unico di bacino (cap. 6.).

Il bilancio necessita di una calibrazione per poter attribuire il giusto valore a tutti gli innumerevoli parametri in gioco. Per raggiungere questo scopo occorre che uno dei parametri incognita del bilancio, la percolazione profonda, corrisponda a ciò che viene misurato nella realtà, e ciò che viene misurato è il deflusso di base alla sezione di chiusura del bacino (cap. 9.1)

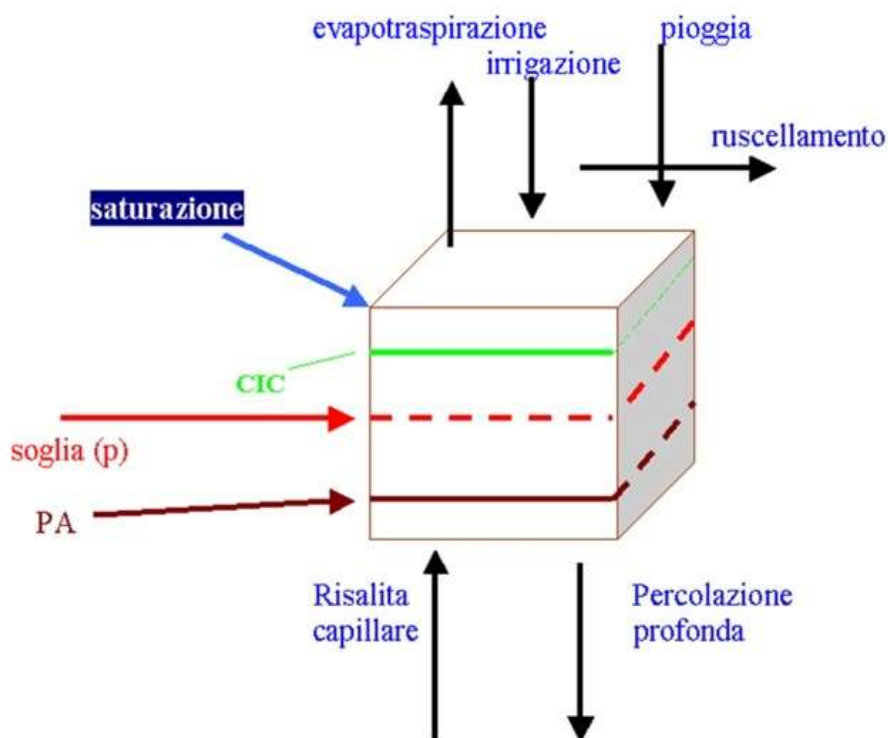


Fig. 10.1 – modello concettuale del bilancio idrogeologico del suolo adottato. CC = capacità di campo, PA = punto di appassimento, soglia (p) = limite tra TAW (acqua disponibile) e RAW (acqua facilmente disponibile)

Il deflusso di base è determinato da acqua che ha subito un percorso ipogeo, proprio quello della percolazione profonda (DP, deep percolation): l'acqua andata in percolazione profonda prima raggiunge le falde acquifere; le falde acquifere, quando ricaricate, vengono drenate dai corsi

d'acqua minori che portano l'acqua al corso principale. Questo percorso non è immediato e ci deve essere ritardo tra la percolazione profonda, la risalita del livello delle falde acquifere e la risalita delle portate misurate alla sezione di chiusura. L'entità del ritardo, a parità di precipitazione e di evapotraspirazione potenziale, dipende dalle caratteristiche del bacino (superficie, geologia-geomorfologia, assetto strutturale, spessore e tessitura dei suoli, pendenze, uso del suolo, ecc.). A livello annuale può accadere che il totale di percolazione non corrisponda con il totale di deflusso proprio per questo ritardo che fa slittare ai primi mesi dell'anno successivo l'effetto della percolazione profonda degli ultimi mesi dell'anno. A livello pluriennale, invece, il totale dei due parametri deve avere valore comparabile. La calibrazione è stata effettuata per l'anno 2013 e ha cercato:

1. corrispondenza tra i valori di DP e deflusso misurato, non solo come valore assoluto poiché ci potrebbe essere shift come visto, ma anche corrispondenza del trend;
2. corrispondenza tra DP e innalzamento del livello delle falde acquifere monitorate (sez. 10.1.2)
3. corrispondenza tra DP e infiltrazione efficace calcolata secondo la procedura descritta nella sez. 10.1.3

La calibrazione ha consentito di dare il giusto valore ai parametri in gioco: valore dei Kc, durata delle fasi fenologiche (per il Kc bacino), valore del parametro B (ruscellamento), profondità delle radici (riserva idrica) ecc. La calibrazione nei punti 1) e 2) è più forte rispetto al punto 3) poiché confronta i valori del modello con valori effettivamente misurati. Il punto 3) non ha dato una buona corrispondenza.

La validazione è avvenuta negli altri anni di bilancio: 2014, 2015, 2016 e il principio è stato lo stesso della calibrazione ma, in questo caso, non si sono più spostati i valori dei parametri quando si è visto che il modello presentava una validazione adeguata, ovvero i punti 1), 2) e 3) presentavano una buona corrispondenza. Nella validazione, visto che interessa più anni, è importante anche il seguente 4° punto:

4. corrispondenza tra il totale di DP e il totale dei deflussi misurati. Per "totale" si intende la somma dei 4 anni di bilancio.

10.1.2 – Il monitoraggio delle falde acquifere come ausilio per la validazione



fig. 10.2 – il pozzo di Cà Furlino

A partire da giugno 2012, contestualmente all'inizio delle misure delle portate, si è iniziata la rilevazione settimanale del livello piezometrico di 4 falde, intercettate da altrettanti pozzi. L'ubicazione dei pozzi, con il rispettivo substrato, è riportato in fig. 10.3. Tutti i pozzi sono portati su depositi quaternari, più permeabili. I pozzi di Cà Furlino (fig. 10.2) e Cà Libraio hanno falda acquifera piuttosto superficiale, 0,5-1,5 m dal piano campagna nei periodi di maggiore livello fino a 2-3 metri nei momenti di siccità; i pozzi di Cerreto e di Cà

Tommasino hanno falda più profonda; in particolare il pozzo di Cà Tommasino ha una grande variazione di livello nel corso dell'anno con un'escursione di anche 10 metri. Attualmente vengono monitorati 13 pozzi, due volte al mese, ma i 4 citati hanno il più lungo set di dati.

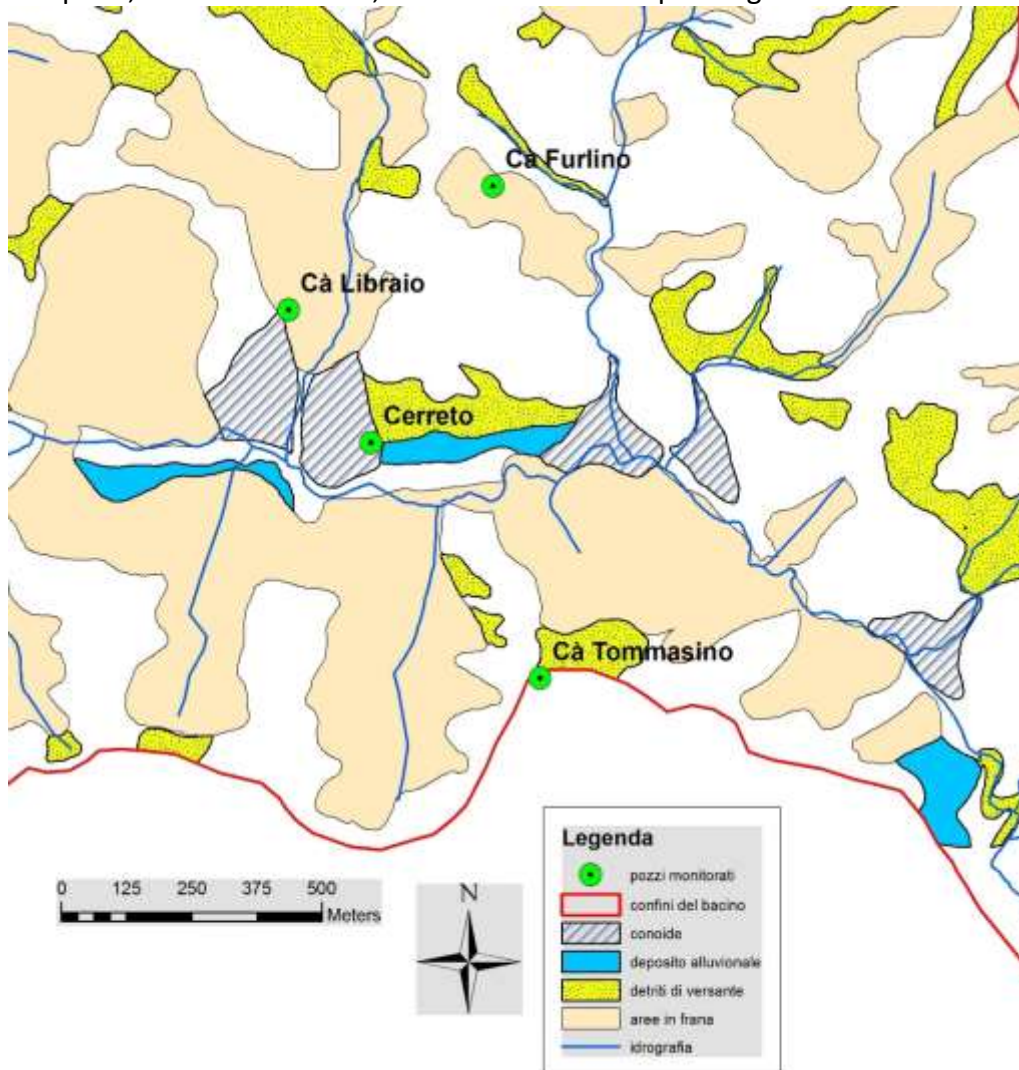


Fig. 10.3 – ubicazione dei pozzi di cui si sono monitorate le falde. È riportato il relativo substrato

I pozzi di Cà Libraio e Cerreto sono soggetti a prelievo a scopo irriguo agricolo (di modesta entità). Il fine di questa rilevazione è stato correlare la percolazione profonda calcolata dal modello con la variazione delle falde acquifere e la variazione dei deflussi misurati alla sezione di chiusura (Bivio Borzaga). Ci deve essere concordanza di trend con i parametri citati. Le fig. 10.4 e 10.5 riportano gli andamenti dei livelli dei 4 pozzi; ogni grafico rappresenta due anni. In ordinata il livello è rappresentato come livello dal piano campagna, cosicché a livelli crescenti corrisponde una maggiore profondità dal piano campagna. Nei livelli riportati sono stati tolti calcolati e tolti i contributi antropici. È stato inoltre calcolato l'andamento di una **falda non reale** ma che media i rilevamenti degli altri 4 pozzi; il trend è stato ottenuto non effettuando una semplice media dei livelli, bensì la media delle variazioni % tra un rilevamento e quello successivo, per ciascun pozzo. Il trend della falda media è uno dei fattori di validazione del bilancio.

Dai grafici si nota la notevole escursione di livello della falda di Cà Tommasino, posta su un'area di crinale ma classificata stranamente come "detriti di versante". La falda di Cà Libraio presenta una

escursione di livello abbastanza bassa, 1,05 m come massima escursione in 4 anni di rilevamenti (tab 10.1); la scala del grafico, tarata sulle variazioni di Cà Tommasino, non consente di apprezzare la variazione che comunque c'è. Soprattutto a ottobre 2013 si nota una risalita quasi contemporanea dei livelli dei 4 pozzi (e quindi anche della falda media), in corrispondenza di una forte cumulata precipitativa settimanale (le precipitazioni riportate in grafico sono corrispondenti alla somma di precipitazioni cadute dal precedente rilevamento). La scala del grafico non consente di apprezzare bene ma tale corrispondenza si verifica anche in altri periodi di rilevamento.

Un'ultima nota sulla falda di Cà Furlino: ha una notevole ricarica anche in anni molto siccitosi come il 2016 ed è una preziosa risorsa di acqua.

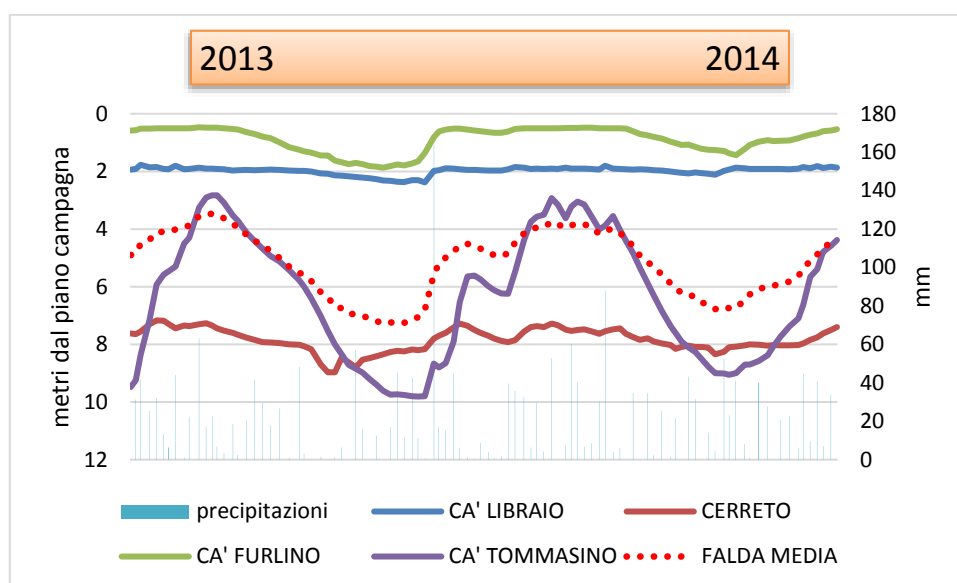


Fig. 10.4 – andamento dei livelli delle 4 falde monitorate e della falda media – anni 2013 e 2014

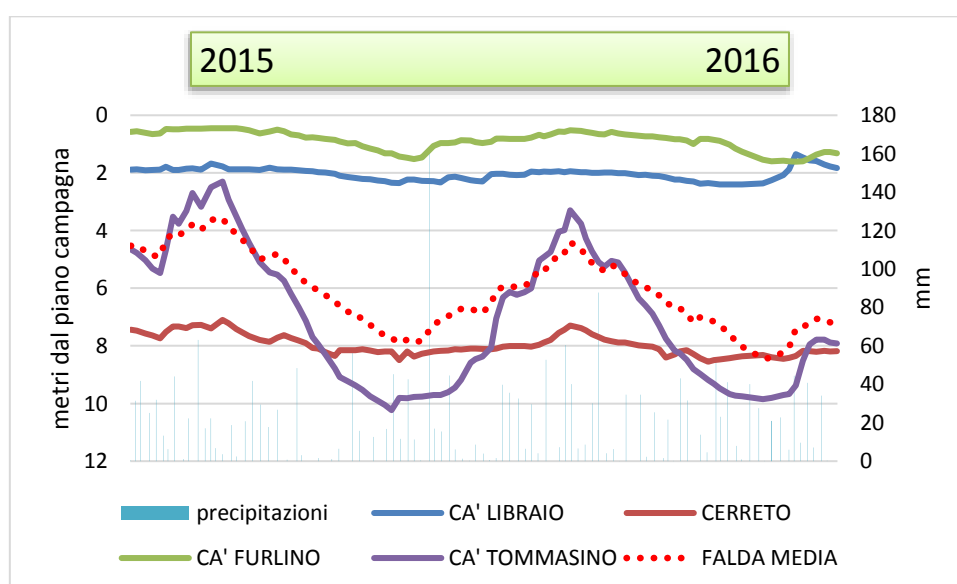


Fig. 10.5 – andamento dei livelli delle 4 falde monitorate e della falda media – anni 2015 e 2016

2013-2016	CA' LIBRAIO	CERRETO	CA' FURLINO	CA' TOMMASINO	FALDA MEDIA
livello max	-1,35	-7,10	-0,45	-2,30	-3,47
livello min	-2,40	-8,97	-1,87	-10,23	-8,43
escursione	1,05	1,87	1,42	7,93	4,96

Tab. 10.1 – livelli minimi e massimi e corrispondente massima escursione per le 4 falde acquifere monitorate

10.1.3 – L'infiltrazione efficace: calcolo e confronto con la percolazione profonda

Il valore di percolazione calcolato con il modello può venire validato anche mediante confronto con l'infiltrazione efficace a livello di bacino. Per calcolarne il valore si è applicata una procedura ispirata a quella utilizzata nel Piano di bacino del Fiume Arno (2010) in cui l'infiltrazione efficace viene stimata da un coefficiente che è funzione di:

- Pendenza
- uso del suolo
- permeabilità del suolo/substrato

La formula è la seguente:

$I_{eff} = P_{eff} \cdot CIP_g\% \cdot C_{pend/suolo}\%$	equazione 10.1
--	----------------

Ove:

P_{eff} = pioggia efficace = $P - ETr$

CIP_g = coefficiente di infiltrazione potenziale relativa alla geologia

$C_{pend/suolo}$ = coefficiente di infiltrazione potenziale relativa alla pendenza e uso del suolo

ETr = evapotraspirazione reale

La fig. 10.6 illustra la procedura utilizzata per il bacino dell'Arno, da cui si è preso spunto. Nella procedura adottata per l'Arno si è stimato il contributo al deflusso di base per ogni formazione geologica attraverso il **base flow index**: 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 (Relazione di piano, AdB Arno, 2010). Nel nostro studio si è assegnata una classe di permeabilità per ogni formazione o copertura affiorante, come fatto per i *soil groups* del *curve number* (tab. 7.9): ad ogni classe è corrisposto un coefficiente d'infiltrazione potenziale (Celico, 1988) (tab. 10.2).

Per quanto riguarda il coefficiente da pendenza/soilo si è seguita la procedura e si è fatto l'incrocio tra uso del suolo e classi di pendenza come riportato in fig. 10.6. Ne deriva che il coefficiente di infiltrazione efficace (CI_{eff}) per il bacino SMA è di:

$$CI_{eff} = CIP_g \cdot C_{pend/suolo} = 0,32 \cdot 0,7 = \mathbf{0,224}$$

Nello studio relativo al Fiume Arno si è utilizzata la formula di *Turc-Santoro* per la determinazione della evapotraspirazione reale. Nello studio relativo al bacino SMA si è calcolata la ETr con il modello idrogeologico su base fenologica; inoltre si sono corrette le precipitazioni con il coefficiente

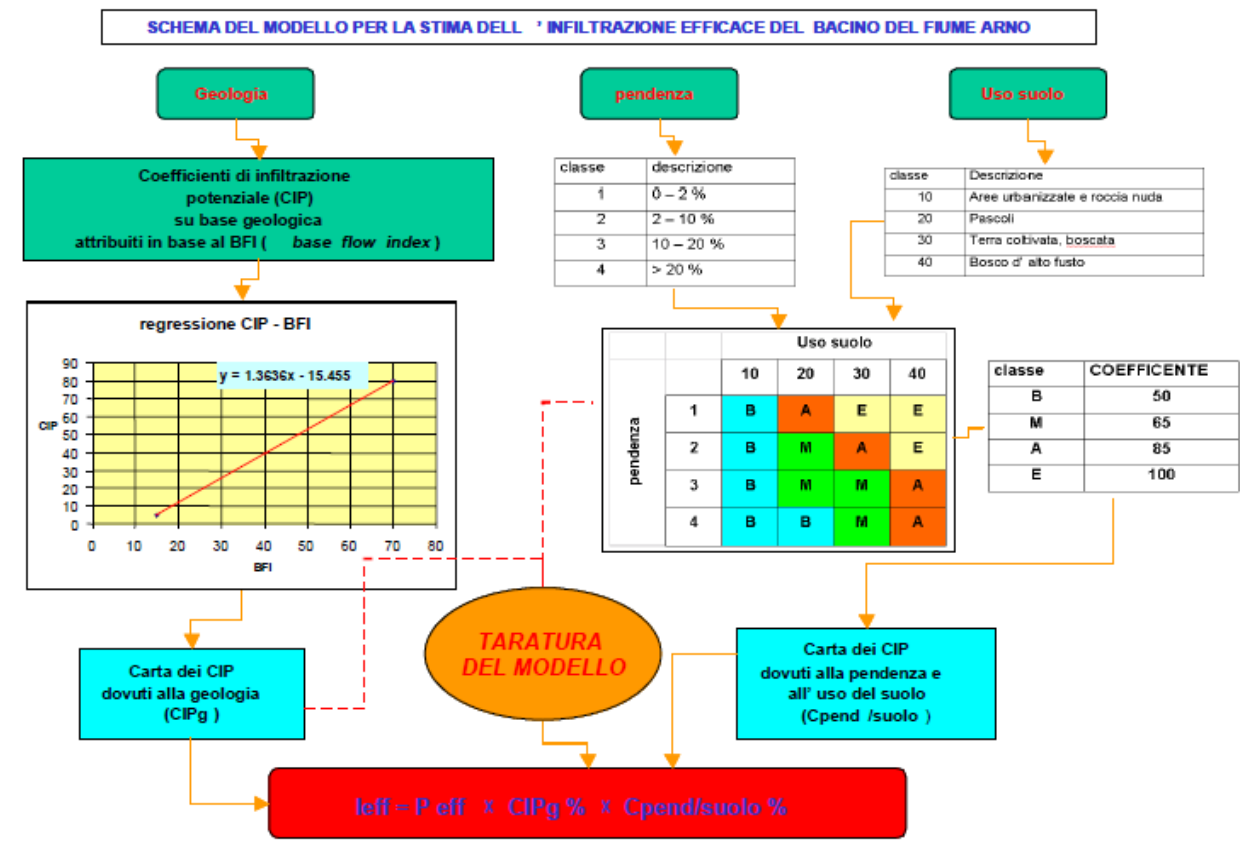


Fig. 10.6 - procedura per la determinazione dell'infiltrazione efficace utilizzata nel Piano di bacino Fiume Arno

SUBSTRATO	CLASSE	range CIP Celico (%)	valore CIP (%)
SCHLIER	molto scarsa	10 – 20	15
DEPOSITI SU SCHLIER	scarsa	10 – 20	20
MARNOSO ARENACEA	scarsa	20 – 40	30
DEPOSITI SU MA	media	20 – 40	35
BISCIARO	media	30 – 50	40
DEPOSITI SU BISCIARO	Medio-alta	30 – 50	45
ALLUVIONI E CONOIDI	elevata	60 – 80	70

Tab. 10.2 - attribuzione di classi di permeabilità e coefficienti di infiltrazione potenziale (CIP) in base alle formazioni geologiche o ai depositi quaternari (alluvioni, conoidi, aree in frana, detriti di versante)

Precipitazioni (Pa) (precipitazioni non corrette)	ETcR bilancio (ETR calcolata con formula di Turc-Santoro)	Percolazione profonda	Infiltrazione efficace = (Pa - ETcR) · C _{leff} ((P - ETR _{Turc}) · C _{leff})	Infiltrazione = Pa · C _{leff} (P · C _{leff})
1022 (1091)	475 (433)	261	126 (147)	229 (244)
1067 (1139)	504 (431)	236	123 (159)	239 (255)
851 (908)	392 (416)	207	103 (110)	191 (203)
834 (890)	462 (411)	149	83 (95)	187 (199)

Tab. 10.3 - calcolo dell'infiltrazione efficace a livello di bacino e confronto con la percolazione profonda. Tra parentesi: infiltrazione efficace calcolata con Precipitazioni non corrette e con ETR Turc-Santoro come da formula originale

d'acclività (Pa). La tab. 10.3 riporta tutti i dati di confronto. Tra parentesi è riportato il valore di C_{leff} calcolato con precipitazioni non corrette e con la formula di Turc. La formula di Turc è la seguente:

$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$	equazione 10.2
--	----------------

Dove:

P = precipitazioni annuali (mm)

$L = 300 + 15T + 0,05T^3$

Oppure modificata da Santoro (1970):

$L = 586 - 10T + 0,05T^3$

con T = temperatura media annuale (°C)

I valori divergono molto, sia applicando le Pa e la ETcR calcolata con il bilancio fenologico, sia usando i parametri originali; il coefficiente sembra lavorare bene se applicato non alla precipitazione efficace ma alla precipitazione "lorda" ma non è ciò per cui è stato modellato. Nel bacino dell'Arno l'infiltrazione media annua è di 105 mm, quindi i valori di infiltrazione calcolati sono compatibili sebbene il CIP_g sia stato ottenuto con un diverso approccio (in questo studio mediante uso dei CIP Celico che hanno però valenza per i siti ove sono stati calibrati). Occorre dire poi che per il bacino dell'Arno tale modello ha avuto taratura e calibrazione.

Se i dati di infiltrazione efficace fossero esatti ne deriverebbe un runoff annuale di 300-400 mm il che sembra essere un valore troppo alto. Però il modello non considera la variazione di riserva idrica: questo perché è un modello che stima la infiltrazione efficace media annua di un certo numero di anni.

10.2 – ANALISI DEI RISULTATI E DELLA CALIBRAZIONE/VALIDAZIONE

10.2.1 – Riepilogo di tutti i valori mensili, calcolati e misurati

Le tabelle 10.4 e 10.5 riportano i dati mensili di tutti i valori calcolati. Si ricorda che il bilancio fenologico è stato calcolato a livello giornaliero (cap.4). La calibrazione e validazione consiste nella corrispondenza tra la percolazione profonda e il deflusso misurato a Bivio Borzaga (stazione di chiusura del bacino SMA). Importante è anche il confronto con l'andamento delle falde acquifere superficiali monitorate.

Il confronto viene spiegato mediante riepilogo annuale e grafici a partire dalla sez. 10.2.2.

2013	mese	ET0a	Kc bac	ETc	Pa	RO	AAW	ETcR	DP	ΔR	deflusso misurato	falde superficiali
	gennaio	21,4	1,07	22,8	98,7	2,7	128,3	22,8	76,5	-3,3	42,5	-4,76
	febbraio	26,9	1,01	26,8	95,6	14,7	127,6	26,8	54,1	-0,1	54,4	-4,14
	marzo	53,1	0,87	46,8	109,3	11,1	127,2	46,8	48,0	3,4	66,5	-3,71
	aprile	96,0	0,68	65,0	48,1	2,5	113,7	65,0	14,8	-34,3	22,1	-3,67
	maggio	114,5	0,95	109,5	109,6	4,3	95,9	109,5	0,0	-4,2	9,4	-4,40
	giugno	155,3	0,98	151,8	75,9	0,9	45,4	88,9	0,0	-13,9	3,7	-5,14
	luglio	182,2	0,84	151,9	5,7	0,0	1,2	2,8	0,0	2,9	0,7	-5,99
	agosto	160,2	0,80	128,5	79,2	0,0	11,9	18,0	0,0	61,2	0,6	-6,83
	settembre	110,2	0,68	73,5	53,0	0,0	10,4	13,5	0,0	39,6	0,9	-7,17
	ottobre	52,8	0,79	41,5	87,2	4,6	61,4	39,9	0,0	42,7	3,9	-7,17
	novembre	21,6	1,04	22,0	232,7	103,4	114,3	22,0	58,8	48,5	23,7	-5,64
	dicembre	24,7	0,79	19,2	27,3	0,1	125,1	19,2	8,6	-0,6	25,5	-4,63
2014	gennaio	26,2	0,77	21,5	66,6	1,8	129,2	21,5	43,2	0,1	23,1	-4,88
	febbraio	42,6	0,90	37,3	83,7	8,0	129,4	37,3	42,8	-4,4	58,3	-4,14
	marzo	72,7	0,73	49,3	121,6	34,6	120,2	49,3	42,3	-4,6	39,2	-3,87
	aprile	91,0	0,84	76,1	96,8	12,2	113,1	76,1	7,5	1,1	57,6	-3,93
	maggio	131,5	0,99	130,9	120,6	34,8	82,9	117,1	26,9	-58,2	47,8	-4,12
	giugno	161,4	0,98	158,1	63,2	0,1	10,8	24,0	0,0	39,1	8,6	-5,00
	luglio	151,9	0,80	122,2	96,4	0,0	9,8	15,0	0,0	81,3	2,9	-5,99
	agosto	155,3	0,73	113,2	20,0	0,0	8,9	15,6	0,0	4,3	1,9	-6,58
	settembre	79,8	0,80	63,8	125,4	6,1	66,2	63,7	0,0	55,7	4,5	-6,58
	ottobre	56,6	0,59	33,6	88,8	10,7	90,6	33,6	0,0	44,5	9,7	-5,99
	novembre	28,1	0,99	26,0	84,8	15,6	118,2	26,0	13,7	29,5	18,4	-5,48
	dicembre	23,1	1,06	24,5	99,5	16,3	129,5	24,5	59,6	-0,8	50,9	-4,59

Tab. 10.4 – valori mensili dei parametri del bilancio fenologico, del deflusso misurato e dell'andamento delle falde superficiali. Tutti i valori sono espressi in mm ad eccezione del livello delle falde (in metri sotto il piano campagna). Anni 2013 e 2014

I parametri sono i seguenti:

ET0a = evapotraspirazione potenziale calcolata con il metodo Penman Monteith e corretta con il coefficiente d'acclività (=ET0·Ca, cap.5)

Kc bac = coefficiente colturale unico a livello di bacino che tiene conto, nella correzione della ETa, di tutti gli usi del suolo nei loro diversi periodi dell'anno (cap.6)

ETc = evapotraspirazione potenziale colturale (=ET0a·Kc bac)

Pa = precipitazioni corrette con il coefficiente d'acclività (=P·Ca, cap.5)

RO = ruscellamento (runoff) calcolato con il metodo curve number applicato ad una modellazione in continuo (cap. 7)

AAW (*available accumulated water*)= riserva idrica disponibile del suolo (capp.4 e 8)

ETcR = evapotraspirazione reale (cap. 4, 6 e 8): è una delle due incognite del bilancio fenologico

DP (*deep percolation*) = percolazione profonda: è una delle due incognite del bilancio fenologico e quel che consente di calibrarlo/validarlo (cap.4)

ΔR = variazione della riserva idrica del suolo: corrisponde anche al bilancio giornaliero dei parametri = P-RO-ETcR-DP (cap.4)

Deflusso misurato = deflusso ottenuto dalle misurazioni settimanali di portata a Bivio Borzaga: s al **deflusso di base** (cap.9)

Falde superficiali = andamento delle 4 falde acquifere monitorate (per la procedura: sez. 10.1.2)

	mese	ET0a	Kc bac	ETc	Pa	RO	AAW	ETcR	DP	ΔR	deflusso misurato	falde superficiali
2015	gennaio	36,3	0,72	24,6	30,2	0,0	121,4	24,6	6,9	-1,3	30,7	-4,66
	febbraio	26,6	1,04	27,5	157,7	41,5	125,6	27,5	89,1	-0,3	56,5	-4,37
	marzo	66,3	0,84	54,2	152,5	33,4	123,2	54,2	75,8	-10,9	71,6	-3,84
	aprile	108,5	0,68	72,6	79,1	7,7	108,8	72,6	7,6	-8,8	33,8	-3,97
	maggio	138,1	0,93	128,3	106,8	16,3	63,6	107,7	0,0	-17,3	15,9	-4,82
	giugno	166,2	0,98	162,1	33,6	0,0	12,2	32,2	0,0	1,4	9,2	-5,16
	luglio	206,0	0,83	171,5	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	1,7	-6,11
	agosto	148,3	0,79	116,5	51,2	0,0	2,3	3,4	0,0	47,8	0,3	-6,86
	settembre	104,1	0,70	65,6	62,9	0,0	10,5	8,0	0,0	54,9	0,2	-7,53
	ottobre	41,9	0,88	37,7	119,6	5,2	91,3	37,7	0,0	76,7	3,8	-7,84
	novembre	30,1	0,65	19,1	52,5	5,5	121,0	19,1	27,4	0,5	3,5	-7,12
	dicembre	14,0	0,31	4,9	1,7	0,0	120,4	4,9	0,0	-3,2	1,8	-6,79
2016	gennaio	34,1	0,89	30,0	75,6	5,5	126,4	30,0	53,8	-13,7	12,7	-6,12
	febbraio	42,7	0,84	33,0	101,9	11,8	126,8	33,0	43,4	13,7	19,1	-5,75
	marzo	62,4	0,88	51,2	109,7	21,2	127,5	51,2	48,4	-11,1	53,8	-4,90
	aprile	102,5	0,71	72,8	53,4	2,1	102,0	72,8	0,0	-21,5	12,3	-4,99
	maggio	129,3	1,00	129,7	96,9	17,3	92,6	126,7	3,8	-51,0	19,5	-5,35
	giugno	151,4	0,99	148,5	84,8	4,8	28,0	59,6	0,0	20,4	4,5	-6,04
	luglio	176,4	0,78	137,8	62,0	0,1	4,7	7,8	0,0	54,1	1,4	-6,69
	agosto	153,1	0,68	104,6	11,9	0,0	0,0	0,0	0,0	11,9	0,8	-7,15
	settembre	96,9	0,75	70,7	55,4	0,0	10,6	12,7	0,0	42,7	0,0	-7,81
	ottobre	42,3	0,93	37,9	78,6	0,0	38,3	29,6	0,0	49,1	0,7	-8,43
	novembre	28,4	1,06	29,9	99,6	8,0	93,2	29,9	0,0	61,7	5,2	-7,65
	dicembre	24,1	0,31	8,4	4,0	0,0	104,6	8,4	0,0	-4,5	1,0	-7,16

Tab. 10.5 – valori mensili dei parametri del bilancio fenologico, del deflusso misurato e dell'andamento delle falde superficiali. Tutti i valori sono espressi in mm ad eccezione del livello delle falde (in metri sotto il piano campagna). Anni 2015 e 2016

10.2.2 – Riepilogo dei valori annuali del bilancio e del deflusso di base

dati espressi in mm di acqua sul bacino

anno	precipitazioni	ETcR	ruscellamento	variazione riserva	deep percolation	deflusso di base misurato	diff %
2013	1022	475	144	142	261	254	3
2014	1067	504	140	187	236	323	-37
2015	851	392	110	142	207	229	-11
2016	834	462	71	152	149	131	12
<i>totali</i>					853	937	-10

anno	deep percolation	deflusso misurato	deep percolation ultimi mesi anno prec.
2013	261	254	67,4
2014	236	323	73,3
2015	207	229	27,4
2016	149	131	

Tab.10.6 – riepilogo dei valori annuali del bilancio fenologico e del deflusso di base misurato

La tabella 10.6 riporta tutti i valori annuali nei 4 anni di bilancio e il confronto con il deflusso di base misurato. C'è una buona corrispondenza tra valori di DP e di deflusso, non solo come valori assoluti ma anche come rapporti tra valori in anni adiacenti. In alcuni anni la DP sottostima il deflusso, in altri è il contrario. Emerge la grande differenza dell'anno 2014. Sarebbe errato però cercare la calibrazione e la validazione del bilancio con una perfetta corrispondenza tra DP e deflusso nell'anno stesso, poiché occorre tempo prima che l'acqua percolata raggiunga la sezione di chiusura ove vengono misurate le portate. Questo è evidente nella parte in basso della tabella 10.6 ove un notevole deflusso degli ultimi mesi dell'anno corrisponde a un maggiore deflusso nei primi mesi dell'anno successivo (si vedano anche le tab. 10.4 e 10.5 per i valori mensili): il tempo del ritardo è il tempo del percorso ipogeo dell'acqua; questo risulterà più chiaro con i grafici delle sez. 10.2.3 e 10.2.4. Questo è causa della divergenza tra i valori annuali della DP e del deflusso. A livello pluriennale, invece, i due valori devono corrispondere e tanto più è lungo l'intervallo temporale tanto più comparabili devono essere i risultati: nel nostro caso con soli 4 anni di bilancio si nota come le somme di DP e deflussi abbiano un'ottima corrispondenza, con differenza solo del 10% (la DP sottostima il deflusso).

Ragguardevole è anche la quantità di acqua della variazione di riserva, ΔR ; come spiegato nel cap. 4.2.4 esso rappresenta la differenza, tra valori positivi e negativi, di tutto il movimento di acqua che c'è nella riserva del suolo. Tale movimento cala quando non ci sono precipitazioni in funzione della richiesta evapotraspirativa; invece sale quando le precipitazioni apportano nuova acqua alla riserva. In tal modo la variazione è rappresentata da continui saliscendi ma il netto è un valore positivo poiché al termine dell'anno la riserva si ricostituisce per intero. A tale scopo si veda la fig. 4.5. Di conseguenza negli apporti di acqua dell'anno n , oltre alle precipitazioni dell'anno n , si dovrebbe contare anche la riserva che è ai massimi grazie alle precipitazioni dell'anno $n-1$ ma, in un certo senso, "scompare" dal bilancio dell'anno n poiché già compresa in quella dell'anno $n-1$. È un

concetto non proprio semplice da comprendere: le precipitazioni dell'anno $n-1$ "preparano il terreno" per il bilancio dell'anno n .

10.2.3 – Confronto tra percolazione profonda e deflusso di base misurato

I grafici di fig. 10.7-8-9 riportano il confronto principale per la calibrazione-validazione del modello, ovvero il confronto tra percolazione profonda (DP) calcolata dal modello e deflusso di base ottenuto da misurazioni di portata a Bivio Borzaga (sezione di chiusura del bacino SMA). Sono grafici doppi sovrapposti ovvero di due anni ciascuno con un anno ripetuto in due grafici, 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016. Lo scopo è di focalizzare sui mesi autunno-vernini che sono i mesi in cui avviene la ricarica delle acque sotterranee (simulata dalla DP) e aumenta il deflusso: si passa da fase di magra a fase di morbida. Come si vede in tutti e tre i grafici c'è corrispondenza tra andamento della DP e del deflusso in termini di discesa e salita. Scendendo nel dettaglio, il deflusso segue sempre la DP nelle fasi di risalita (ad eccezione dei primi mesi della risalita 2014-2015): è dovuto al tempo necessario al percorso ipogeo dell'acqua (si veda anche la sez. 10.2.4. per il tema delle falde acquifere). Questo "ritardo" è ben evidente nei mesi invernali quando avviene la ricarica, con i picchi di deflusso da 1 a 3-4 mesi dopo il picco di DP. L'eccezione dei primi mesi della risalita 2014-2015 può essere dovuta a particolari condizioni che ad esempio hanno portato a un elevato valore di deflusso ipodermico che ha fatto sì che il deflusso aumentasse prima che la DP avesse effetto, ma occorrerebbe indagare meglio questo fenomeno. Si ricorda che questi sono valori mensili ma se si potrebbe fare un'analisi anche a scala temporale minore (almeno settimanale dato che le portate sono state rilevate di settimana in settimana). Anche nella fase di discesa il deflusso segue la DP; questo è dovuto al fatto che la DP cessa ma le falde acquifere ricaricate sono ancora a livelli alti ed apportano acqua alla rete idrografica.

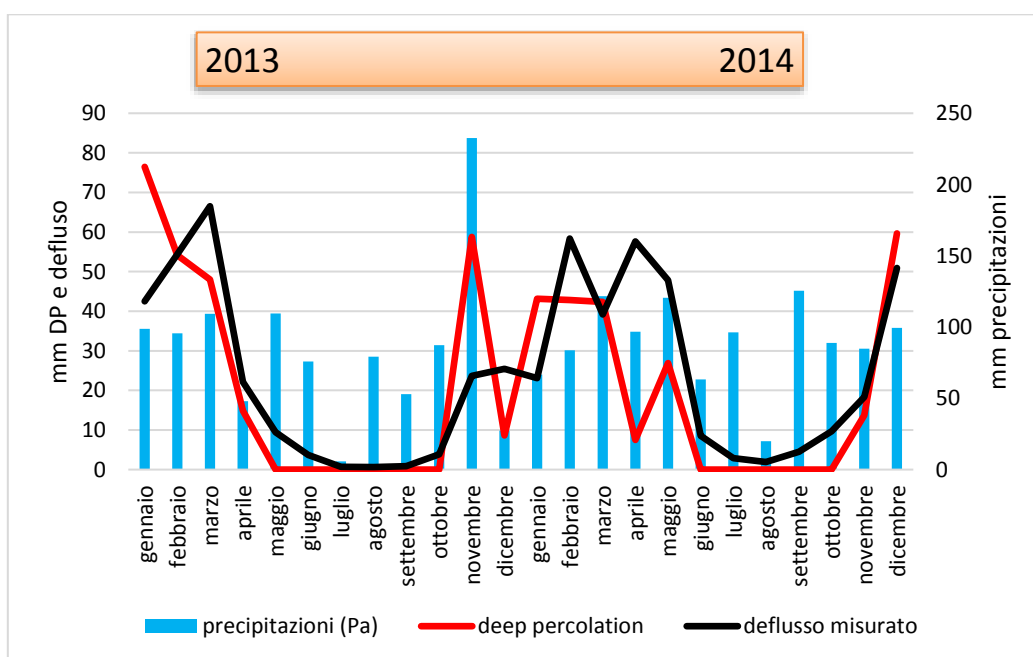


Fig. 10.7 – andamento della percolazione profonda e del deflusso di base misurato – anni 2013-2014

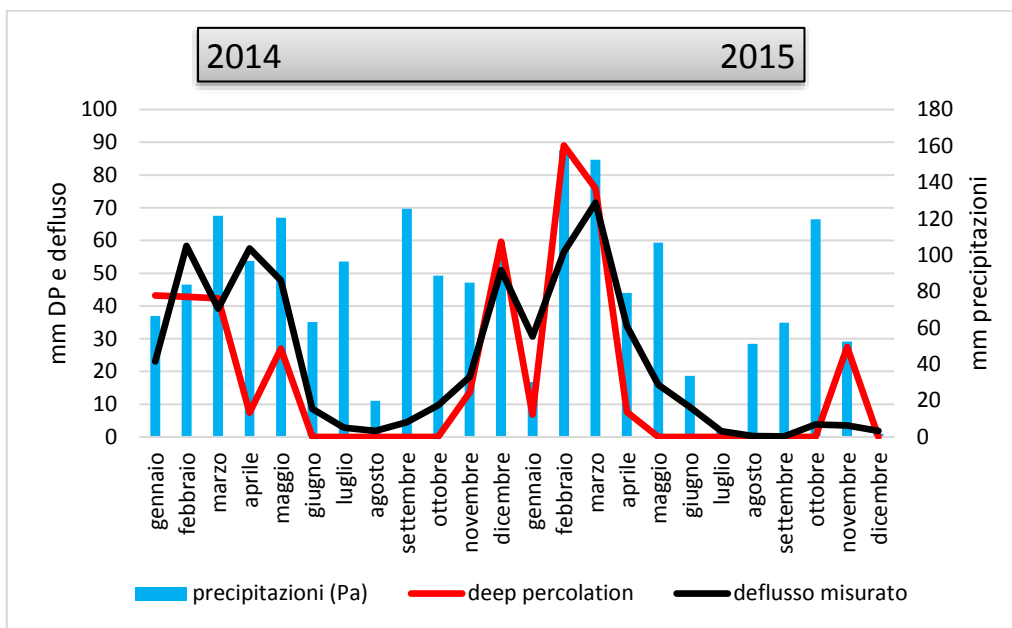


Fig. 10.8 – andamento della percolazione profonda e del deflusso di base misurato – anni 2014-2015

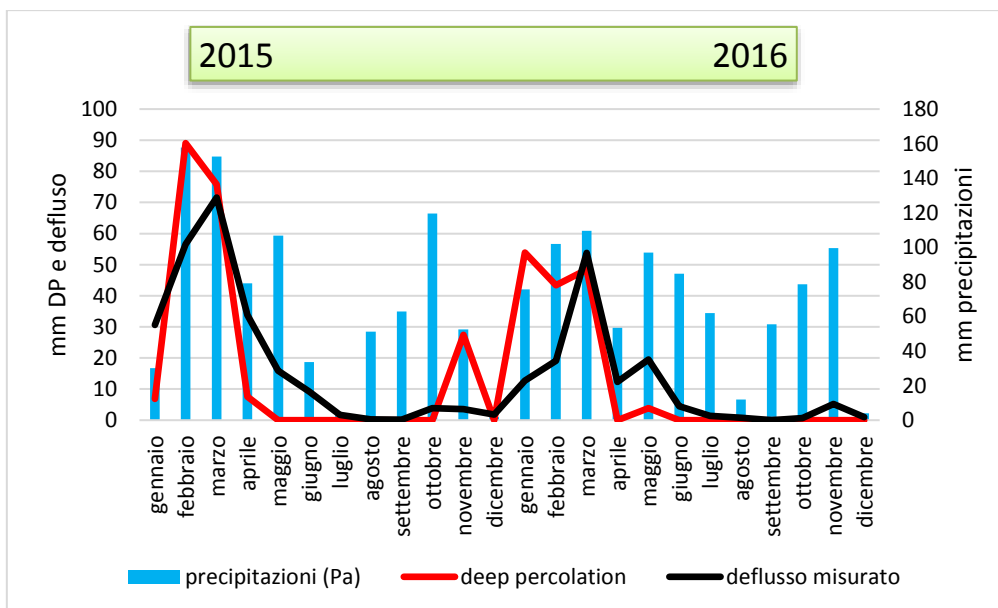


Fig. 10.9 – andamento della percolazione profonda e del deflusso di base misurato – anni 2015-2016

10.2.4 – Confronto tra percolazione profonda e la variazione delle falde acquifere

Un altro metro di confronto della bontà del modello è il confronto tra DP-deflusso-variazione delle falde acquifere monitorate. Nella sez. 10.1.2 si è visto come è stato ottenuto un trend che rappresenta tutti gli andamenti delle falde acquifere. Le fig. 10.10-11-12 sono, come le tre precedenti, grafici di doppi anni sovrapposti. Sono molto importanti poiché il DP calcolato dal

modello viene confrontato con due parametri misurati in campo. Per quanto riguarda le falde non contano i valori ma il trend, ovvero quando iniziano le salite e discese e quale forma assume la curva, mentre nel confronto DP-deflusso si può confrontare il trend ma anche il valore in mm. Il trend ci dice che c'è corrispondenza tra andamento delle falde e andamento della DP e del deflusso: l'inizio della discesa delle falde corrisponde sempre all'inizio della discesa del deflusso e segue di poco il picco della DP; la fine della discesa termina sempre dopo la discesa di DP-deflusso. Questo è compatibile: infatti prima cessa la percolazione, poco dopo le falde iniziano ad abbassarsi e inizia anche ad arrivare meno acqua al corso d'acqua (poiché le falde sono meno drenate o anche acqua che segue un percorso più profondo inizia a ridursi); in un certo periodo la DP cessa, le falde si stanno abbassando e a un certo punto vanno sotto il livello di drenaggio: a quel punto non contribuiscono più al deflusso, e il deflusso cala rapidamente; tuttavia le falde continuano ad abbassarsi ma senza che questo abbia più ripercussioni sul deflusso poiché non sono più drenate e il deflusso ormai è ai minimi. Nella fase di risalita accade che le falde seguano la DP prima del deflusso; risalite fino al livello di drenaggio iniziano a contribuire al deflusso che sale in maniera importante: infatti il deflusso a un certo punto della risalita ha sempre un picco che le falde non hanno. Le falde hanno un andamento molto meno ripido in quanto si abbassano e alzano con regolarità, la roccia acquifera non è come un corso d'acqua e ha un effetto tampone. Il deflusso è espressione delle portate e si sa che tra le portate minime e massime ci può essere sempre un grande divario, che si ripercuote un po' anche sul deflusso di base.

Anche nella fase di risalita vi è buona correlazione nei tempi con la risalita della DP, sebbene in alcuni casi sembra che le falde "anticipino leggermente" la risalita della DP, ma può essere dovuto alla scala di rappresentazione mensile.

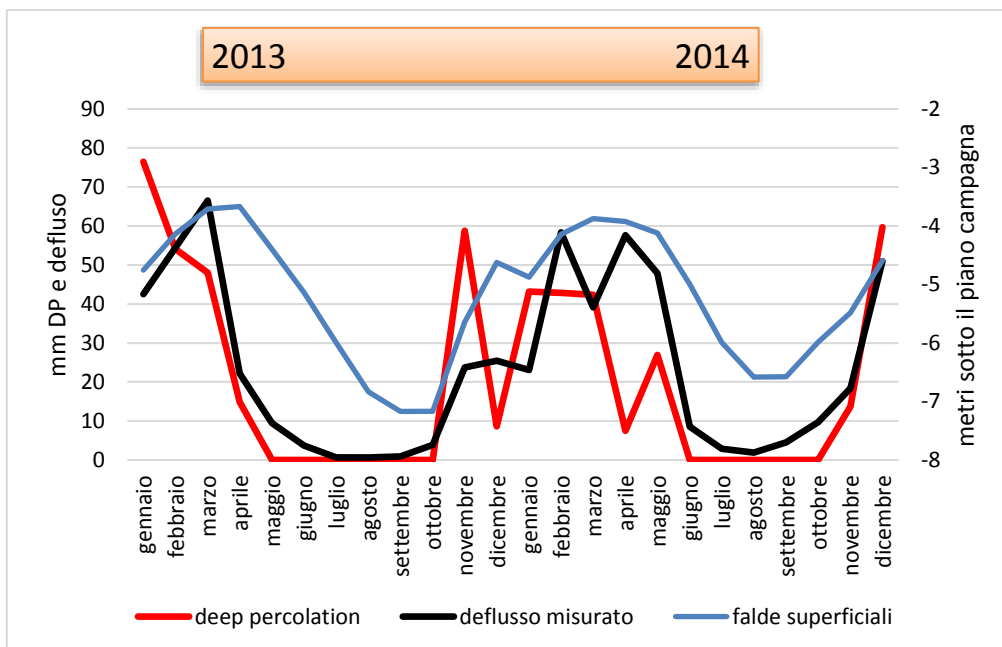


Fig. 10.10 – andamento del livello delle falde acquifere correlato con la DP e il deflusso – anni 2013-2014

È molto singolare il picco contemporaneo dei tre parametri del dicembre 2014: in questo caso non c'è ritardo del deflusso di base e del livello delle falde acquifere. È probabilmente dovuto alla

notevole quantità di pioggia caduta da settembre 2014 a dicembre: ci deve essere poi stato a dicembre, molto piovoso anch'esso, un periodo di saturazione di suoli e pioggia diffusa che ha reso molto più veloce la circolazione idrica nel sottosuolo. Si ricorda comunque che è un dato mensile e non giornaliero, ma la corrispondenza è comunque un po' anomala.

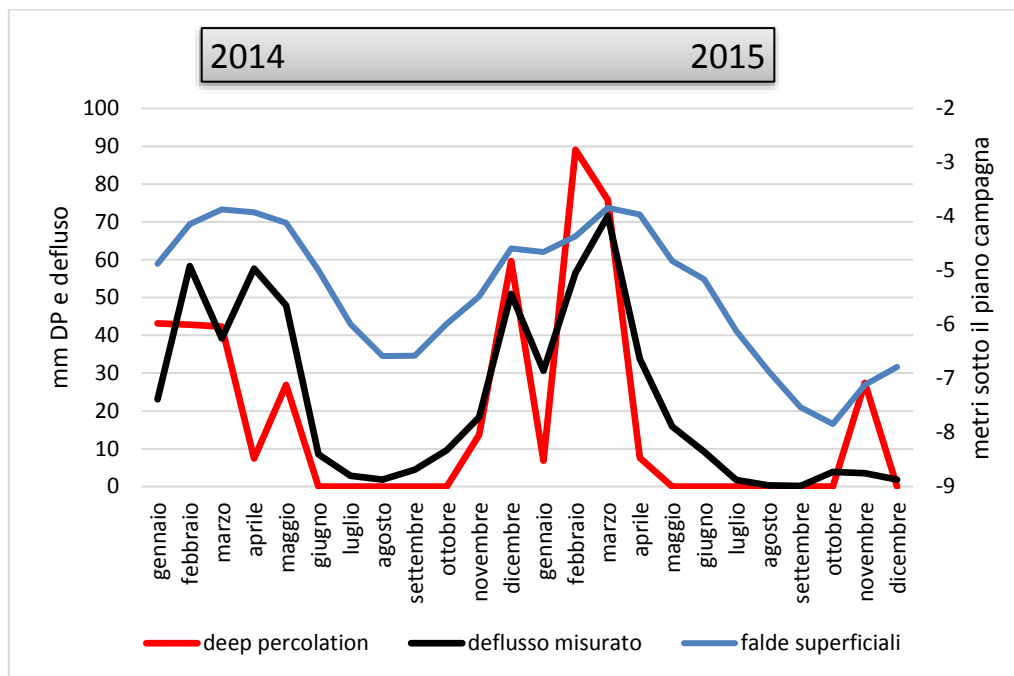


Fig. 10.11 – andamento del livello delle falde acquifere correlato con la DP e il deflusso – anni 2014-2015

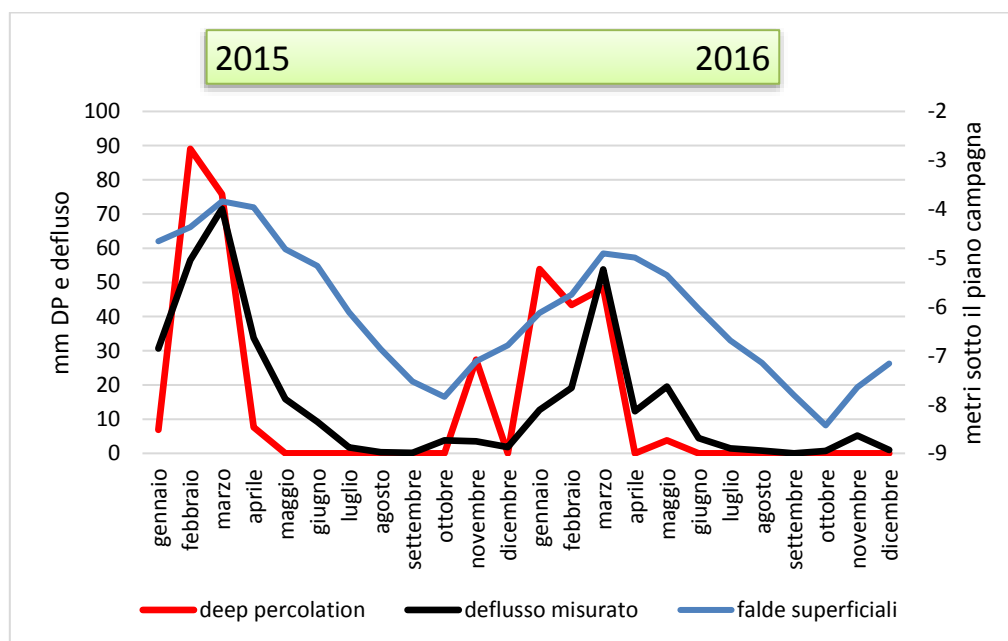


Fig. 10.12 – andamento del livello delle falde acquifere correlato con la DP e il deflusso – anni 2015-2016

10.2.5 – Confronto tra percolazione profonda, ruscellamento e riserva idrica del suolo

I seguenti grafici riportano il confronto tra percolazione profonda (DP), ruscellamento (RO) e variazione della riserva idrica nel suolo (AAW). Ogni grafico rappresenta 2 anni e non ci sono sovrapposizioni. Si nota come sia la DP che il RO presentino valori elevati quando la riserva idrica è ai massimi; questo è infatti il processo con cui il modello lavora: quando la riserva è satura l'acqua in surplus va in parte in percolazione profonda e in parte in ruscellamento.

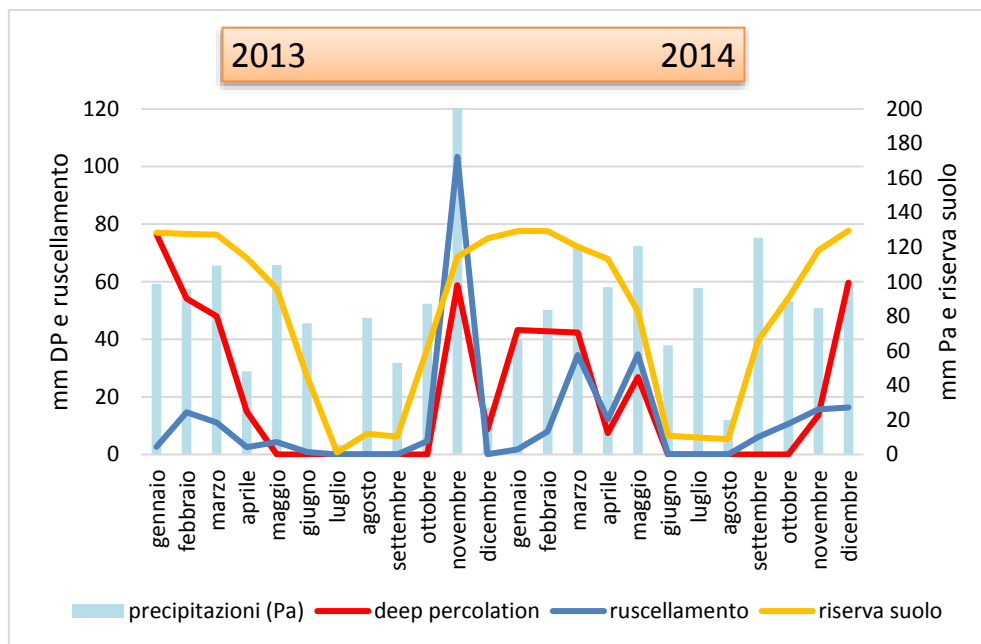


Fig. 10.13 – andamento del ruscellamento in correlazione con DP e riserva idrica del suolo – anni 2013 e 2014

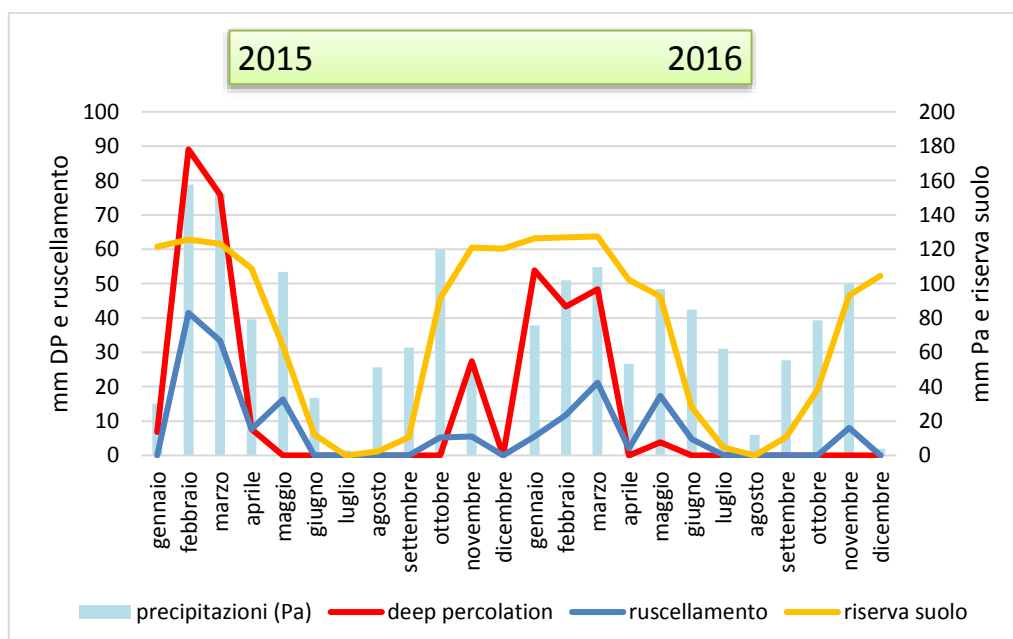


Fig. 10.14 – andamento del ruscellamento in correlazione con DP e riserva idrica del suolo – anni 2014 e 2015

I picchi di RO corrispondono sempre con importanti cumulate precipitative mensili tranne per mesi in cui la riserva è ai minimi, in cui non c'è RO; infatti sarebbe sbagliato cercare una corrispondenza immediata tra precipitazioni e RO poiché entrano in gioco anche altri fattori come la ETC e, come detto, lo stato di saturazione dei suoli. Si ricorda che il RO è calcolato fuori bilancio, mediante procedura di *curve number* in continuo (cap. 7).

10.2.6 – Confronto tra ruscellamento e deflusso di base misurato

Questi due grafici rappresentano uno degli storici problemi dell'idrologia, ovvero la separazione del deflusso misurato totale in deflusso di base e ruscellamento. Si è già spiegato le modalità con cui sono stati ottenuti i valori dei due diversi parametri, si vuole solo ricordare che il deflusso di base è un valore misurato e il ruscellamento è calcolato. Ovviamente entrambi hanno dei minimi estivi ma il RO resta a zero per un periodo più lungo dato che dipende molto dallo stato di saturazione dei suoli. La notevole precipitazione di novembre 2013 è stata formata da un'intensa precipitazione di pochi giorni che ha prodotto un notevole RO ed anche DP (fig. 10.13) ma gli effetti sul deflusso di base si sono visti solo dopo alcuni mesi. La somma, mese per mese, dei valori dei due parametri fornisce il deflusso totale in uscita dal bacino.

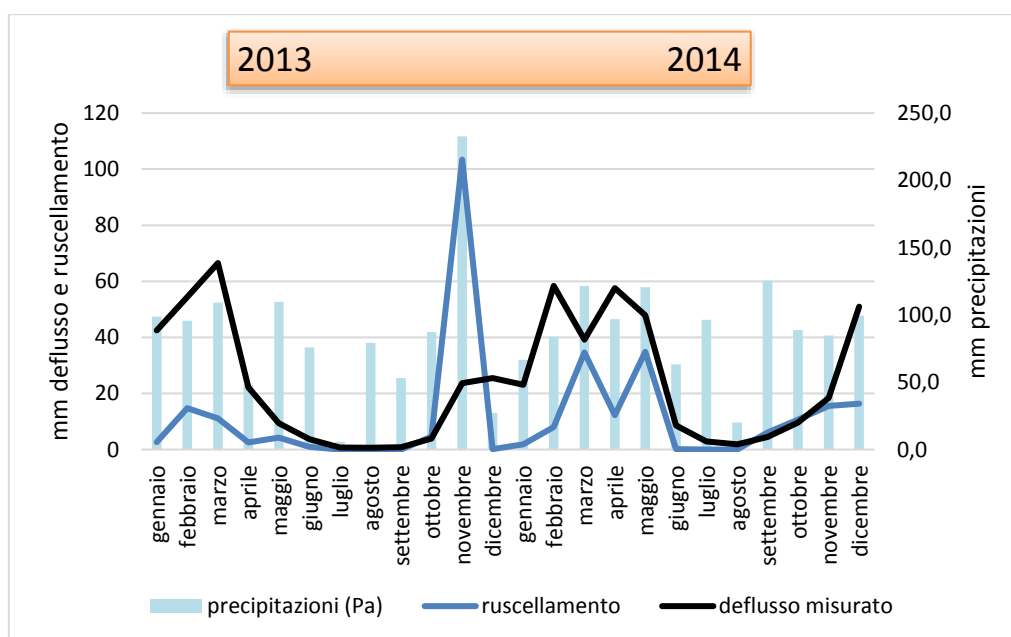


Fig. 10.15 – andamento del ruscellamento e del deflusso di base misurato – anni 2013 e 2014

Occorre dire che il runoff ha dimensione temporale molto breve, anche sub-giornaliera, e quindi la semplice somma mensile dei suoi valori, come riportato in grafico, può non essere del tutto adatta per il confronto con il deflusso di base che ha valori molto più costanti e che quindi ben si presta a rappresentazioni mensili.

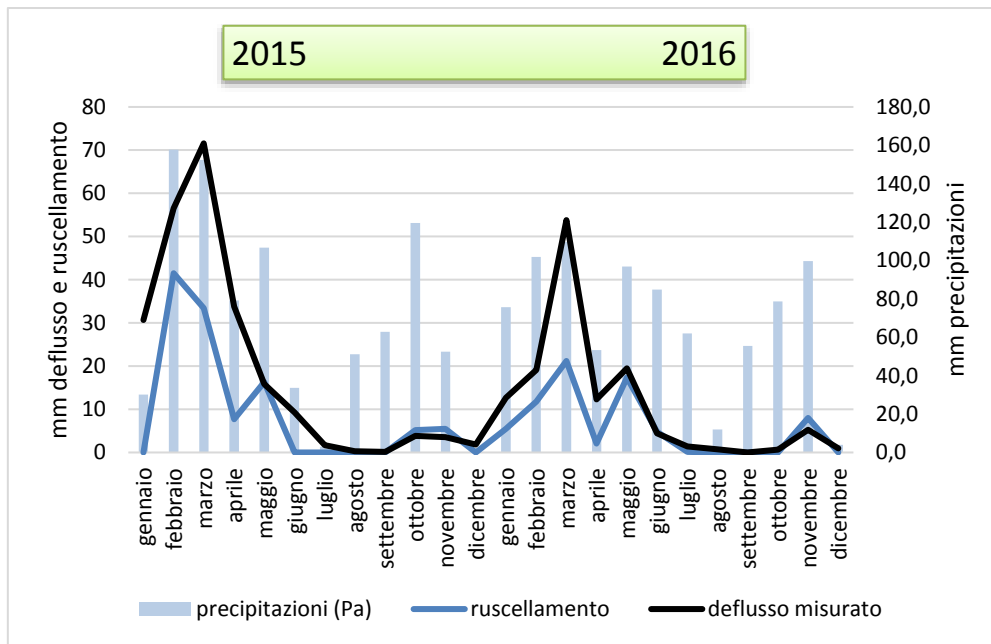


Fig. 10.16 – andamento del ruscellamento e del deflusso di base misurato – anni 2014 e 2015

10.3 – IL DEFICIT IDRICO DI BACINO

Il modello su cui si basano i grafici che seguono è utilizzato da tempo in idrologia; tuttavia i seguenti grafici sono differenti in quanto:

- riportano la evapotraspirazione culturale (ETc) a livello di bacino e non solo la evapotraspirazione potenziale e reale;
- riportano il coefficiente unico culturale di bacino (Kc bac), necessario per determinare la ETc a partire dalla ET0a (evapotraspirazione potenziale calcolata con il metodo Penman Monteith e poi corretta per il coefficiente d’acclività Ca)

Inoltre i valori riportati sono cumulate mensili di valori giornalieri e non sono stati calcolati come mensili. Oltre ai citati parametri, i grafici riportano anche le precipitazioni corrette con il Ca (Pa) e la variazione della riserva idrica. I grafici sono divisi per singoli anni.

L’evapotraspirazione potenziale è già stata corretta con il coefficiente d’acclività, quindi si tratta di ET0a. I valori di ET0a subiscono due abbassamenti:

- 1) il primo è dovuto al Kc bac; infatti $ETc = ET0a \cdot Kc \text{ bac}$. ETc rappresenta la massima richiesta evapotraspirativa del bacino, ma funzione dell’effettivo uso del suolo in tutte le sue fasi fenologiche durante l’anno: è proprio il Kc bac a tenere in considerazione questo effetto;
- 2) il secondo è il passaggio da ETc a evapotraspirazione reale ETcR, e sono le condizioni di stress idrico a determinare questo step. Il calo della riserva idrica del suolo è indicatore delle condizioni di stress idrico.

Il primo passaggio è rappresentato, in fig. 10.17, dalla freccia rossa; il secondo dalla freccia gialla. L'area tra ET_c ed ET_{cR} delimitata dalla freccia gialla è il **deficit idrico di bacino**, ovvero tutta la richiesta evapotraspirativa del bacino che non riesce a venire soddisfatta dagli apporti di acqua, dati dalle precipitazioni e dalla riserva idrica del suolo. Se ci fosse un ipotetico sistema di irrigazione del bacino potremmo fornire acqua nella giusta misura per fare sì che la ET_{cR} abbia gli stessi valori di ET_c . In effetti è questo lo scopo dello studio effettuato: poter studiare le dinamiche idrogeologiche a livello di bacino con il livello di precisione richiesto negli studi di carattere irriguo.

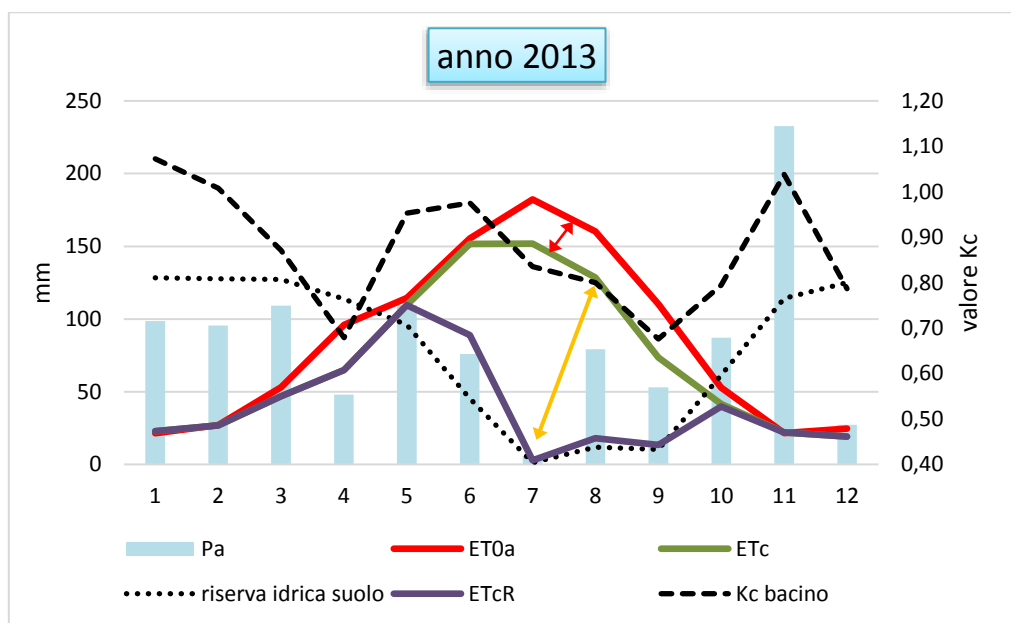


Fig. 10.17 – andamento mensile dei principali parametri evapotraspirativi del bilancio e indicazione del deficit idrico di bacino (freccia gialla) – anno 2013

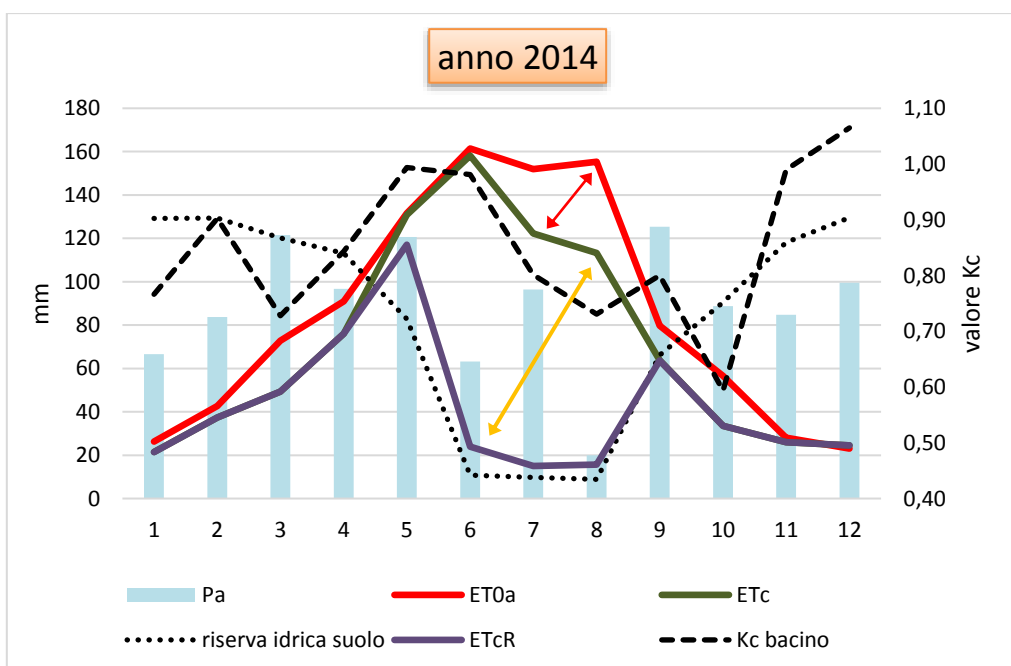


Fig. 10.18 – andamento mensile dei principali parametri evapotraspirativi del bilancio e indicazione del deficit idrico di bacino (freccia gialla) – anno 2014

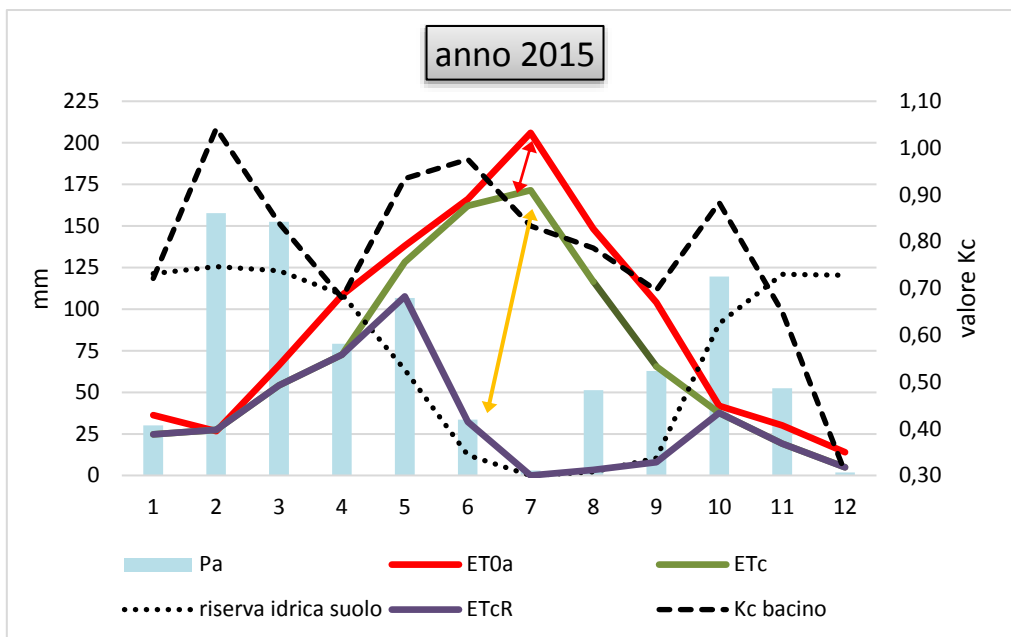


Fig. 10.19 – andamento mensile dei principali parametri evapotraspirativi del bilancio e indicazione del deficit idrico di bacino (freccia gialla) – anno 2015

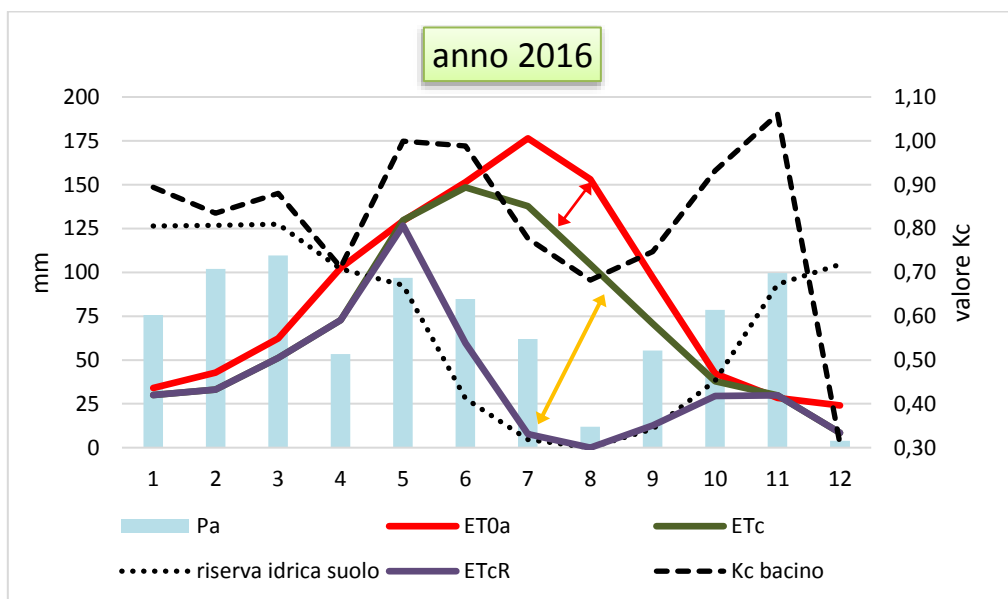


Fig. 10.20 – andamento mensile dei principali parametri evapotraspirativi del bilancio e indicazione del deficit idrico di bacino (freccia gialla) – anno 2016

CONCLUSIONI

Lo studio di dottorato ha permesso di sperimentare un nuovo approccio alla modellazione del bilancio idrogeologico su scala temporale giornaliera attraverso l'applicazione, a scala di bacino, delle procedure utilizzate in ambito agrario per il dosaggio dell'acqua di irrigazione. Questo approccio, che ambisce a raggiungere una notevole precisione nella stima dei parametri, prevede l'estensione dell'impiego dei coefficienti colturali, usati per correggere l'evapotraspirazione potenziale e tarati per le singole colture (quaderno FAO n°56, Allen et. al., 1998), a tutto il territorio, comprese le terre non agricole: ciò ha comportato una fase di ricerca per trovare i valori adatti a tutte le classi di uso del suolo nonché ricerca della durata delle fasi fenologiche (infatti i coefficienti colturali sono relativi alle colture e alle fasi fenologiche delle colture stesse). Si è così riusciti a calcolare un **coefficiente colturale unico a livello di bacino**, a scala giornaliera, con cui correggere la evapotraspirazione potenziale: questa era già stata preventivamente corretta con il coefficiente d'acclività. La modellazione del bilancio ha infatti previsto anche la correzione dei valori di evapotraspirazione potenziale e di precipitazione rispettivamente con il coefficiente d'acclività e con il suo inverso, per tenere conto della superficie reale del bacino e non di quella proiettata. Per il calcolo del ruscellamento ci si è basati sul metodo *curve number* (USDA, 1972) poi modificato per la simulazione in continuo (Williams, 2000). Per i dati sulla riserva idrica dei suoli si sono estrapolati a livello di bacino i valori di un profilo realizzato dall'ASSAM nel 2003, in località Cerreto. I dati sull'uso del suolo negli anni di bilancio sono stati ottenuti mediante fotointerpretazione di immagini aeree. È stata realizzata anche la carta di uso del suolo 1955 che, assieme quelle del 1997 e del 2013, ha consentito un'interessante analisi sull'evoluzione di uso del suolo nel bacino, così importante per il bilancio idrogeologico.

Il calcolo dell'evapotraspirazione reale è stato ottenuto mediante il bilancio idrogeologico giornaliero su base fenologica il quale prevede un bilancio idrico del suolo su cui assume importanza un coefficiente che descrive lo stato di stress idrico delle coltivazioni e, in questo caso, anche degli altri usi del suolo.

Il modello di bilancio giornaliero su base fenologica è stato applicato al piccolo bacino del Fosso Santa Maria degli Angeli, (SMa, 14,35 km² di superficie reale). Per la calibrazione e la validazione si è reso necessario un monitoraggio settimanale delle portate alla sezione di chiusura; la calibrazione è stata effettuata nell'anno 2013 mentre la validazione nei tre anni successivi. Il monitoraggio dei livelli piezometrici delle falde acquifere in 4 pozzi ha consentito un'ulteriore validazione, più di tipo qualitativo (trend) che quantitativo.

I risultati denotano una buona corrispondenza a livello di valori pluriennali tra deflusso di base misurato e percolazione profonda simulata dal modello; altresì, a scala temporale annuale, vi è buona concordanza tra i trend di deflusso di base misurato, percolazione profonda simulata e falde acquifere monitorate sia nelle fasi di risalita che di discesa.

I valori di percolazione profonda e di deflusso di base non sono strettamente comparabili nell'anno singolo poiché c'è ritardo da parte del deflusso di base, ritardo che corrisponde al tempo del percorso ipogeo dell'acqua, cosicché capita che il deflusso aumenti nei primi mesi dell'anno in funzione di percolazione avvenuta negli ultimi mesi dell'anno precedente. Questo è ben simulato dal modello. Anche il trend dell'andamento delle falde acquifere, nelle sue fasi di risalita e di discesa, è certamente compatibile con il trend della percolazione profonda; nel caso delle falde non si può fare un confronto a livello di valori ma solo di trend. Invece a livello pluriennale i valori cumulati di percolazione profonda e di deflusso di base dovrebbero corrispondere, e i dati calcolati trovano conforto in quanto i due valori differiscono solo del 10% su totali di circa 850-950 mm (cumulate degli anni 2013-2014-2015-2016).

La piccola dimensione del bacino SMa ha consentito di elaborare una notevole mole di dati geografici, geologici, geomorfologici, di pendenza/esposizione ecc. Al fine di applicare il modello a un bacino più grande sono state effettuate misurazioni di portata, a partire da agosto 2015, anche alla sezione di chiusura del bacino del medio-alto Fiume Metauro, a Calmazzo. Le misurazioni di portata, effettuate con mulinello idrometrico e con galleggianti per la misura della velocità dell'acqua, sono state svolte settimanalmente in contemporanea con la misura sul bacino SMa. Al fine di una migliore comparazione tra i valori e i trend di

deflusso dei due bacini è stata fatta un'accurata analisi fisiografica anche del bacino medio-alto Metauro. Le numerose misure di portata hanno consentito di elaborare relazioni idrauliche per facilitare la misura della portata in periodi di piena.

Non è possibile per ora applicare il modello di bilancio fenologico al bacino del Metauro poiché manca una accurata carta di uso del suolo; inoltre anche altri parametri andrebbero rappresentati a scala maggiore (geologia, permeabilità ecc.). Acquisiti questi dati, sarà possibile effettuare il bilancio per il 2016-2017, anni di rilevazione del deflusso di base.

Il modello è passibile di ulteriori miglioramenti, attraverso:

- una migliore calibrazione dei coefficienti colturali sull'ambito locale, per esempio attraverso sistemi che consentano di misurare direttamente l'evapotraspirazione reale (lisimetri) o applicando coefficienti che sono stati utilizzati specificatamente per l'area mediterranea (che però sono tutti relativi alle sole aree agricole, lasciando non soddisfatta la necessità di trovare valori per le aree non agricole); è possibile anche provare ad utilizzare il *double crop coefficient* in luogo del *single crop coefficient* (cap. 6.2.1)
- una maggiore precisione nell'attribuzione delle conduzioni dei seminativi (ovvero ciò che è effettivamente coltivato); nell'ambito dell'uso del suolo ciò che cambia di anno in anno sono le conduzioni dei seminativi e questo ha notevole impatto sul bilancio. La conduzione è stata stimata con fotointerpretazione ma possono essere disponibili dati esatti come i dati derivanti da richiesta di contributi agricoli;
- una maggiore conoscenza delle caratteristiche tessiturali e di profondità dei suoli, per meglio stimare la riserva idrica;
- una rilevazione in continuo delle portate che consentirebbe di stimare meglio il ruscellamento e il deflusso di base.

Il modello di bilancio idrogeologico giornaliero su base fenologica può essere applicato in continuo e aggiornato di anno in anno a seconda delle condizioni meteorologiche e dell'uso del suolo e può fornire accurate stime della risorsa idrica di bacino.

APPENDICE

VALORI DI PORTATA DEL FOSSO SANTA MARIA DEGLI ANGELI E DEL FIUME MEDIO-ALTO METAURO

periodo AGOSTO 2015-AGOSTO 2017

Di seguito si riportano tutti i valori portata calcolati a partire da rilevazioni di velocità (m/s) e sezione (m²) nei siti di misura di Bivio Borzaga (chiusura del bacino del Fosso di Santa Maria degli Angeli) e Calmazzo (chiusura del bacino del Fiume medio-alto Metauro). Le misure sono relative al periodo che va dal momento in cui sono iniziate le misure a Calmazzo, agosto 2015, fino ad agosto 2017; per il Bacino SMA sono disponibili tuttavia misurazioni a partire da giugno 2012 (qua non riportate). Le misure hanno avuto cadenza settimanale fino a dicembre 2016, poi mensile.

Le prime due colonne riportano le misurazioni effettuate con mulinello idrometrico, iniziate da marzo 2016. Ad ogni misura di portata effettuata con mulinello è corrisposta una misura di portata effettuata con i galleggianti, al fine di trovare una relazione tra le due (cap. 9.5). Infatti a volte non è possibile effettuare le misure con il mulinello per velocità dell'acqua troppo bassa oppure, al contrario, per condizioni di piena; in quei casi le misure sono effettuate solamente con galleggianti, ma dalla relazione tra portate mulinello e portate galleggianti si possono correggere tali portate e riportarle come se fossero state effettuate con mulinello. Le colonne 3 e 4 riportano questi valori. Per completezza tale relazione si è applicata anche alle misurazioni con galleggianti che hanno corrispondente misura con mulinello, al fine di vedere quanto questa relazione distorce il valore stimato da quello vero (misura con mulinello). Tutti i valori di portata sono espressi in **litri/secondo**.

Ad esempio il 06 aprile 2016 è stata effettuata la misura con mulinello, da cui è stata calcolata per il Metauro una portata di 4342 l/s. È stata fatta anche la misura con i galleggianti che è risultata molto maggiore: 6370 l/s (qua non riportata per semplicità). Per il bacino SMA i valori di portata mulinello-galleggiante sono molto più vicini. A noi interessa riportare i valori delle portate ottenute da galleggianti a valori di portata come se fossero state misurate da mulinello (che sono più attendibili), in modo da poter utilizzare le misure di portata da galleggianti nei momenti in cui sono le uniche a poter essere effettuate come nei casi sopra riportati di piena o magra eccessiva, oppure quando il mulinello non è utilizzato per indisponibilità o perché non si ha il tempo necessario per fare una misura completa (occorrono 1-1,5 ore). Utilizzando le equazioni di portata della tabella 9.6, per portate da galleggianti comprese tra 1000 e 10000 l/s (infatti qua è di 6370 l/s), si è ottenuta una portata "corretta" (come se fosse stato utilizzato il mulinello) di 4459 l/s, quindi avente un valore davvero molto prossimo al valore effettivamente misurato con mulinello di 4342 l/s. Allora questa equazione è affidabile, e ad esempio è stata utilizzata per correggere la portata misurata con galleggianti del 15 ottobre 2015 di 3150 l/s (qua non riportata) ottenendo un valore corretto di 2255, che dovrebbe essere prossimo al valore che si sarebbe ottenuto mediante mulinello (che nel 2015 ancora non era disponibile in quanto acquistato a marzo 2016). Per altri valori di portata galleggiante (<1000 o >10000 l/s) ci sono altre equazioni per il Metauro, e poi ci sono le equazioni per il Santa Maria per il quale è stato fatto analogo procedimento.

N.B. per il Fosso SMA è stata posta una portata minima di 8l/s per le difficoltà di effettuare misure in periodi di magra eccessivi. Il valore di 8 l/s è stato posto considerando il contributo del depuratore. Tale valore, corretto secondo le equazioni, corrisponde a un valore di 6 l/s (come se fosse stato misurato da mulinello).

data	Medio-alto Metauro	Santa Maria d. Angeli	Medio-alto Metauro	Santa Maria d. Angeli
	CALMAZZO	BIVIO BORZAGA	CALMAZZO	BIVIO BORZAGA
	misura mulinello (l/s)	misura mulinello (l/s)	misura corretta (l/s)	misura corretta (l/s)
10/08/2015			160	6
17/08/2015			98	6
25/08/2015			201	6
02/09/2015			85	6
09/09/2015			63	6
14/09/2015			50	6
23/09/2015			34	11
28/09/2015			189	8
06/10/2015			979	11
15/10/2015			2255	15
20/10/2015			1369	17
29/10/2015			1153	58
09/11/2015			376	23
16/11/2015			399	21
24/11/2015			3415	43
02/12/2015			1956	26
07/12/2015			1139	20
18/12/2015			717	15
22/12/2015			480	21
29/12/2015			427	15
07/01/2016			16039	131
12/01/2016			7242	73
20/01/2016			3396	51
27/01/2016			2110	50
02/02/2016			1653	33
10/02/2016			9793	60
17/02/2016			27086	313
24/02/2016			5601	75
01/03/2016			15579	136
10/03/2016	inizio uso mulinello	328	17087	304
18/03/2016	8223	156	8274	144
24/03/2016		651	12229	615
29/03/2016	7565	228	7255	197
06/04/2016	4342	129	4459	112
12/04/2016	3364	95	3295	76
20/04/2016	2227	58	2243	53
27/04/2016	2589	52	2282	64

05/05/2016	8330	194	7907	222
10/05/2016	4427	83	4616	112
17/05/2016	6328	37	6877	73
26/05/2016	3526		3209	40
01/06/2016	1856		2043	34
08/06/2016	1359		1479	26
16/06/2016	1654		1716	37
22/06/2016	1811		1945	35
29/06/2016	719		847	24
10/07/2016			393	11
19/07/2016			475	13
27/07/2016			311	10
30/07/2016	479		554	11
08/08/2016	212		294	13
16/08/2016	103		120	13
22/08/2016	124		172	7
28/08/2016			102	6
09/09/2016	290		237	6
14/09/2016	99		119	6
21/09/2016	423		362	6
12/10/2016	676		822	16
19/10/2016	585		496	11
02/11/2016	463		520	6
09/11/2016	4755		4561	13
16/11/2016	5219	31	5069	31
22/11/2016	5886		6011	33
29/11/2016	2755		2564	51
07/12/2016	1707		1819	11
14/12/2016	1288		1205	11
28/12/2016	811		803	24
11/01/2017	834		898	158
25/01/2017	5894	182	6107	191
21/02/2017	4673	126	4534	135
10/03/2017	10393	231	10524	264
11/04/2017	1715	51	1487	72
11/05/2017	3494	53	3562	38
09/06/2017	498		450	11
20/07/2017	75		51	6
14/08/2017	45		35	6

Indice delle figure	
CAPITOLO 2 - LE AREE DI STUDIO	
2.1 – la vallata principale del bacino del Fosso SMa	p. 9
2.2 – mappa del bacino SMa	p. 10
2.3 – modello 3D del bacino SMa	p. 11
2.4 – profilo dello spartiacque idrografico visto da Sud	P. 11
2.5 – sottobacini del bacino SMa	p. 12
2.6 – aree in sinistra e destra idrografica del bacino SMa	p. 12
2.7 – gerarchizzazione del reticolo secondo Strahler	p. 13
2.8 – mappa delle fasce altimetriche del bacino SMa	p. 14
2.9 – grafico con superfici delle fasce altimetriche del bacino SMa	p. 14
2.10 – curva ipsografica del bacino SMa	p. 15
2.11 – curve ipsografiche di riferimento	p. 15
2.12 – classi di pendenza del territorio SMa	p. 16
2.13 – classi di esposizione del territorio SMa	p. 16
2.14 – il bacino SMa “ridotto”	p. 17
2.15 – il sito di misura delle portate a Bivio Borzaga (foto aerea)	p. 18
2.16 – formazioni geologiche del bacino SMa	p. 19
2.17 – carta delle coperture del bacino SMa	p. 20
2.18 – superfici proiettate delle coperture del bacino SMa	p. 20
2.19 – mappa del bacino del medio-alto Fiume Metauro, con gli affluenti principali in corrispondenza dei principali abitati	p. 22
2.20 – classi di pendenza del bacino medio-alto Metauro	p. 24
2.21 – classi di esposizione del bacino medio-alto Metauro	p. 24
2.22 – fasce altimetriche del bacino medio-alto Metauro	p. 25
2.23 – curva ipsografica del bacino medio-alto Metauro	p. 25
2.24 – percentuale delle aree a diversa permeabilità per il bacino medio-alto Metauro	p. 27
2.25 – percentuale delle aree a diversa permeabilità per il bacino SMa	p. 28
2.26 – mappa dell’uso del suolo Corine Land Cover per il bacino medio-alto Metauro	p. 31
2.27 – mappa della vulnerabilità-permeabilità per il bacino medio-alto Metauro	p. 32
CAPITOLO 3 - ANALISI DELL’USO DEL SUOLO NEL BACINO SANTA MARIA DEGLI ANGELI	
3.1 – foto aerea e descrizione delle classi di uso del suolo “area presso edificato” ed “edificato”	p. 34
3.2 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “terreno a riposo”	p. 34
3.3 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “seminativo a cereali”	p. 35
3.4 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “seminativo a girasole”	p. 35
3.5 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “seminativo a foraggio”	p. 36
3.6 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “incolto”	p. 36
3.7 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “bosco rado”	p. 37
3.8 – foto aerea e descrizione della classe di uso del suolo “bosco”	p. 38
3.9 – comparazione di porzioni di territorio 1955-2013	p. 43
3.10 – carta di uso del suolo 1955	p. 44
3.11 – carta di uso del suolo 1997	p. 45
3.12 – carta di uso del suolo 2013	p. 46
CAPITOLO 4 - IL BILANCIO IDROGEOLOGICO SU BASE FENOLOGICA	
4.1 – il ciclo idrologico con le varie componenti del bilancio	p. 47
4.2 – non coincidenza tra bacino idrografico e bacino idrogeologico	p. 48

4.3 – Afflussi e deflussi in un territorio differente dal bacino	p. 48
4.4 – modello di bilancio idrico del suolo utilizzato	p. 53
4.5 – grafico che illustra l’andamento, per l’anno 2014, della riserva idrica del suolo e delle variazioni di riserva	p. 61
4.6 – curva di Budyko	p. 63
4.7 – differenti relazioni per la stima della AET annuale	p. 63
4.8 – le curve di Zhang et al. con differenti valori del parametro w (acqua disponibile per le piante)	p. 64
4.9 – curva di Budyko e altre varianti	p. 64
CAPITOLO 5 - STIMA E ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI E DELLA EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE (ET₀) E CORREZIONE CON IL COEFFICIENTE DI ACCLIVITA’	
5.1 - schematizzazione delle condizioni per l’applicazione del Ca	p. 66
5.2 – ubicazione delle 4 stazioni meteo dell’Osservatorio “A. Serpieri” - Urbino	p. 68
5.3 – ubicazione delle 4 stazioni meteo dell’Osservatorio “A. Serpieri” - Urbino	p. 69
5.4 – le resistenze che incontra il flusso di vapore, parametri dell’equazione di Penman Monteith	p. 69
5.5 – caratteristiche della ipotetica coltura di riferimento (erba, erba medica, festuca)	p. 70
5.6 – andamento delle precipitazioni e della ET ₀ (corrette con il Ca) per il 2013 e 2014	p. 75
5.7 – andamento delle precipitazioni e della ET ₀ (corrette con il Ca) per il 2015 e 2016	p. 75
5.8 – medie mensili di precipitazioni corrette (Pa), evapotraspirazione di riferimento corretta (ET _{0a}) e temperature per la stazione meteo di Urbino	p. 76
5.9 – andamento di precipitazioni corrette (Pa), evapotraspirazione di riferimento corretta (ET _{0a}) e temperature per la stazione meteo di Urbino	p. 76
5.10 – mappa delle fasce altimetriche del bacino del medio-alto Metauro	p. 77
CAPITOLO 6 – L’EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE CULTURALE (ET_c) NEL BACINO	
6.1 – tre dei quattro tipi di evapotraspirazione	p. 79
6.2 – i coefficienti per ottenere tre dei quattro tipi di evapotraspirazione	p. 79
6.3 – fasi fenologiche e corrispondenti valori di K _c per una generica coltura	p. 82
6.4 – rapporti tra evaporazione dal suolo e traspirazione delle piante o colture durante il ciclo di vita della coltura	p. 85
6.5 – grafico per la determinazione del K _c TN per un evento inferiore a 10 mm e per tutti i tipi di terreno	p. 87
6.6 – grafico per la determinazione del K _c TN per un evento maggiore di 40 mm e per terreni a tessitura grossolana	p. 87
6.7 – grafico per la determinazione del K _c TN per un evento maggiore di 40 mm e per terreni a tessitura medio-fine	p. 88
6.8 – andamento mensile del K _c TN nell’anno 2015	p. 89
6.9 – erba medica in fiore	p. 91
6.10 – cicli di taglio di un impianto di erba medica (Idaho, USA) con relativi K _c e durata delle varie fasi	p. 91
6.11 – terreni a riposo con i suoi costituenti avena selvatica e menta selvatica	p. 92
6.12 – cespuglio di ginestra (<i>spartium junceum</i>) in fiore	p. 93
6.13 – alcune specie appartenenti alla componente di uso suolo “arbusti/piccoli alberi”	p. 94
6.14 – albero isolato di roverella (<i>quercus pubescens</i>) di grandi dimensioni	p. 95
6.15 – andamento del K _c per una foresta decidua alpina	p. 96
6.16 – fasi fenologiche delle componenti di uso del suolo (SCHEMA)	p. 99
6.17 – andamento del K _c TN (bi-settimanale) e del K _c tabellato del grano invernale	p. 106
6.18 – andamento del K _c effettivo del grano invernale	p. 106
6.19 – andamento del K _c TN (bi-settimanale) e del K _c tabellato dell’erba medica	p. 107

6.20 – andamento del Kc effettivo dell'erba medica	p. 107
6.21 – andamento del KcTN (bi-settimanale) e del Kc tabellato del bosco	p. 108
6.22 – andamento del Kc effettivo del bosco	p. 108
6.23 – andamento annuale dei Kc tabellati delle classi miste	p. 109
6.24 – andamento mensile del Kc bacino effettivo per l'anno 2013	p. 110
6.25 – andamento mensile del Kc bacino effettivo per l'anno 2014	p. 110
6.26 – andamento mensile del Kc bacino effettivo per l'anno 2015	p. 111
6.27 – andamento mensile del Kc bacino effettivo per l'anno 2016	p. 111
CAPITOLO 7 - IL RUSCELLAMENTO	
7.1 – tasso di ruscellamento su terreni a diversa pendenza	p. 112
7.2 – grafico che riporta curve per valori di CN da 20 a 100 (passo 10)	p. 113
7.3 – contributo di ciascuna classe di uso del suolo al CN del bacino e al runoff del bacino (anno 2015)	p. 123
7.4 – valore medio 2015 di CN di ciascuna classe	p. 123
CAPITOLO 8 - LA RISERVA IDRICA DEI SUOLI, IL COEFFICIENTE DA STRESS IDRICO E LA EVAPOTRASPIRAZIONE REALE	
8.1 – i due livelli entro cui è compresa l'acqua disponibile per le piante, la capacità di campo (upper storage limit) e punto di appassimento (lower storage limit)	p. 131
8.2 – acqua gravifica, alla capacità di campo, al punto di appassimento e % di terreno-acquapori nei tre punti	p. 132
8.3 – ubicazione del profilo completo di suolo realizzato dall'ASSAM nel 2003	p. 134
8.4 – il podere a seminativo su cui è stato effettuato il rilevamento ASSAM 2003	p. 134
CAPITOLO 9 - LA MISURA DELLE PORTATE E IL CALCOLO DEL DEFLUSSO DI BASE	
9.1 – deflusso di base, deflusso ipodermico, ruscellamento	p. 139
9.2 – sezione di un corso d'acqua con differenti velocità dell'acqua	p. 140
9.3 – il flusso dell'acqua presenta una maggiore velocità in sinistra idrografica	p. 140
9.4 – la misura della portata come somma delle portate di ciascuna sotto-sezione	p. 141
9.5 – la misura della portata come somma delle portate di ciascuna sotto-sezione (mean section method UNI EN ISO 748:2008)	p. 141
9.6 – distribuzione delle portate parziali nella sezione	p. 142
9.7 – micro-mulinello idrometrico OTTC2 corr-tek utilizzato per le misure	p. 143
9.8 – esempio di rilevamento dei parametri per la misura della portata alla sezione di chiusura del bacino Santa Maria degli Angeli (04 dicembre 2013)	p. 143
9.9 – schematizzazione dell'alveo del Fosso Santa Maria degli Angeli a Bivio Borzaga	p. 144
9.10 – sezione reale e modellata per la misura della portata con galleggianti del 04/12/2013	p. 144
9.11 – misure di velocità del mulinello, al 60% della profondità per la stima della velocità media, sub-superficiale per ottenere relazioni idrauliche	p. 145
9.12 – i due siti di misura delle portate, a Bivio Borzaga (per il Fosso di Santa Maria degli Angeli) e a Calmazzo (per il Fiume medio-alto Metauro)	p. 146
9.13 – ubicazione del sito di misura delle portate per il medio-alto Metauro a Calmazzo	p. 147
9.14 – ubicazione del sito di misura delle portate per il Fosso Santa Maria degli Angeli a Bivio Borzaga	p. 147
9.15 – ubicazione del depuratore delle Conce	p. 148
9.16 – confronto tra le portate del Fosso Santa Maria degli Angeli e del medio-alto Fiume Metauro – misure settimanali da agosto 2015 a dicembre 2016	p. 154
9.17 – confronto tra le portate del Fosso Santa Maria degli Angeli e del medio-alto Fiume Metauro – misure mensili da gennaio 2017 ad agosto 2017	p. 155

9.18 – curva di deflusso (regressione lineare) livelli-portate per il SMA da agosto 2015 ad agosto 2017	p. 156
9.19 – curva di deflusso (regressione potenziale) livelli-portate per il SMA da giugno 2012 a gennaio 2014 (intero periodo di tesi di laurea specialistica)	p. 157
9.20 – curve di deflusso (regressione esponenziale) livelli-portate per il SMA in 4 periodi differenti da giugno 2012 a gennaio 2014	p. 157
9.21 – curve di deflusso livelli-portate per il SMA in 4 periodi differenti da giugno 2012 a gennaio 2014, espresse in scala logaritmica	p. 158
9.22 – curva livello-portate (regressione lineare) per il Fiume Metauro a livello del ponte di Trajano	p. 158
9.23 – curva livello-portate (regressione lineare) per il Fiume Metauro a livello del sito di misura	p. 159
9.24 – sistema per la misura della velocità superficiale dell’acqua con radar posizionato su un ponte	p. 160
CAPITOLO 10 - CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL BILANCIO CON ANALISI DEI RISULTATI	
10.1 – modello concettuale del bilancio idrogeologico del suolo adottato	p. 163
10.2 – il pozzo di Cà Furlino	p. 164
10.3 – ubicazione dei pozzi di cui si sono monitorate le falde	p. 165
10.4 – andamento dei livelli delle 4 falde monitorate e della falda media – anni 2013 e 2014	p. 166
10.5 – andamento dei livelli delle 4 falde monitorate e della falda media – anni 2015 e 2016	p. 166
10.6 – procedura per la determinazione dell’infiltrazione efficace utilizzata nel Piano di bacino Fiume Arno	p. 168
10.7 – andamento della percolazione profonda e del deflusso di base misurato – anni 2013-2014	p. 173
10.8 – andamento della percolazione profonda e del deflusso di base misurato – anni 2014-2015	p.174
10.9 – andamento della percolazione profonda e del deflusso di base misurato – anni 2014-2015	p. 175
10.11 – andamento del livello delle falde acquifere correlato con la DP e il deflusso – anni 2014-2015	p. 176
10.12 – andamento del livello delle falde acquifere correlato con la DP e il deflusso – anni 2015-2016	p. 176
10.13 – andamento del ruscellamento in correlazione con DP e riserva idrica del suolo – anni 2013 e 2014	p. 177
10.14 – andamento del ruscellamento in correlazione con DP e riserva idrica del suolo – anni 2014 e 2015	p. 177
10.15 – andamento del ruscellamento e del deflusso di base misurato – anni 2013 e 2014	p. 178
10.16 – andamento del ruscellamento e del deflusso di base misurato – anni 2014 e 2015	p. 179
10.17 – andamento mensile dei principali parametri evapotraspirativi del bilancio e indicazione del deficit idrico di bacino – anno 2013	p. 180
10.18 – andamento mensile dei principali parametri evapotraspirativi del bilancio e indicazione del deficit idrico di bacino – anno 2014	p. 180
10.19 – andamento mensile dei principali parametri evapotraspirativi del bilancio e indicazione del deficit idrico di bacino – anno 2015	p. 181
10.20 – andamento mensile dei principali parametri evapotraspirativi del bilancio e indicazione del deficit idrico di bacino – anno 2016	p. 181

Indice delle tabelle	
CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE	
1.1 – dati del bilancio, parametri a cui sono applicati, fonti di provenienza	p. 7-8
CAPITOLO 2 - LE AREE DI STUDIO	
2.1 – estremi e coordinate del bacino	p. 9
2.2 – pendenza media delle aree su cui affiorano le formazioni geologiche	p. 19
2.3 – pendenza media dei depositi continentali quaternari e delle aree esterne su cui affiorano le diverse formazioni	p. 21
2.4 – descrizione delle confluenze tra gli affluenti e il corso principale del medio-alto Fiume Metauro	p. 23
2.5 – comparazione tra i bacini Santa Maria degli Angeli (bacino ridotto) e medio-alto Metauro considerando differenti parametri	p. 26
2.6 – tabella delle classi di vulnerabilità/permeabilità	p. 27
2.7 – superfici proiettate delle classi di uso del suolo Corine Land Cover IV livello 2012 relativamente ai due bacini oggetto di studio	
CAPITOLO 3 - ANALISI DELL'USO DEL SUOLO NEL BACINO SANTA MARIA DEGLI ANGELI	
3.1 – prodotti cartografici di uso del suolo realizzati	p. 33
3.2 – classi di uso del suolo e componenti delle classi di uso del suolo	p. 39
3.3 – superficie proiettata delle classi di uso del suolo nei 4 anni di bilancio	p. 40
3.4 – superficie proiettata delle componenti di uso del suolo nei 4 anni di bilancio	p. 40
3.5 – superficie proiettata delle classi di uso del suolo negli anni 1955-1997-2013	p. 41
3.6 – pendenza media dei principali uso del suolo 1997, con coefficiente di acclività	p. 41
CAPITOLO 4 - IL BILANCIO IDROGEOLOGICO SU BASE FENOLOGICA	
4.1 – I parametri del bilancio idrogeologico giornaliero su base fenologica	p. 52
4.2 – legenda esplicativa dei colori utilizzati nelle tabelle di esempio	p. 54
4.3 – un periodo del bilancio 2014: inizio della percolazione profonda	p. 55
4.4 – un periodo del bilancio 2014: inizio dello stress idrico	p. 56
4.5 – un periodo del bilancio 2014: esaurimento della riserva idrica del suolo	p. 56
4.6 – un periodo del bilancio 2014: fluttuazione della riserva attorno al minimo nei mesi estivi	p. 57
4.7 – un periodo del bilancio 2014: inizio della risalita stabile della riserva e fine dello stress idrico	p.58
4.8 – un periodo del bilancio 2014: ritorno del ruscellamento e della percolazione profonda	p. 58
4.9 – relazioni tra dati e parametri del bilancio idrogeologico su base fenologica	p. 60
4.10 – confronto tra l'evapotraspirazione reale calcolata con l'equazione di Zhang e l'evapotraspirazione reale calcolata con il bilancio fenologico	p. 65
CAPITOLO 5 - STIMA E ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI E DELLA EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE (ET0) E CORREZIONE CON IL COEFFICIENTE DI ACCLIVITA'	
5.1 – stazioni meteo i cui dati sono stati utilizzati per lo studio	p. 68
5.2 – dati di input per il calcolo della ET0 PM	p. 71
5.3 – equazioni di regressione quota/precipitazione basati su dati 1960-2003 delle stazioni dell'Istituto Idrografico	p. 72
5.4 – foglio di calcolo per la determinazione della pioggia mensile caduta sul bacino medio-alto Metauro con l'utilizzo delle regressioni quota/precipitazioni e delle fasce altimetriche	p. 73

5.5 – equazioni di regressione quota/temperatura basati su dati 1960-2003 delle stazioni dell'Istituto Idrografico	p. 74
5.6 – cumulate annuali di precipitazioni ed ET ₀ (corrette con il Ca), per gli anni di bilancio 2013-14-15-16 nel bacino SMA	p. 75
CAPITOLO 6 – L'EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE COLTURALE (ET_c) NEL BACINO	
6.1 – i 3 tipi di coefficienti con cui si corregge la ET ₀ per giungere alla ET _{cR}	p. 78
6.2 – dati di RH _{min} , di U ₂ per le fasi mid ed end delle componenti di uso del suolo per l'anno 2014. Altezza massima delle colture.	p. 84
6.3 che riprende la 3.2 – classi di uso del suolo e componenti delle classi di uso del suolo	p. 90
6.4 – calcolo dei valori per la componente di uso suolo "arbusti/piccoli alberi"	p. 95
6.5 prima parte – durata delle fasi fenologiche e valori dei K _c tabellati (corretti per il clima) delle componenti di uso del suolo	p. 100
6.5 seconda parte – durata delle fasi fenologiche e valori dei K _c tabellati (corretti per il clima) delle componenti di uso del suolo	p. 101
6.5 terza parte – durata delle fasi fenologiche e valori dei K _c tabellati (corretti per il clima) delle componenti di uso del suolo	p. 102
6.6 – classi dell'uso del suolo e aree/pesi – esempio	p. 103
6.7 – classi di uso del suolo e componenti delle classi - esempio	p. 103
6.8 – valori dei K _c tabellati delle componenti di uso del suolo e valori del K _c TN - esempio	p. 104
6.9 – calcolo dei valori dei K _c effettivi delle classi uniche - esempio	p. 104
6.10 – calcolo dei valori dei K _c effettivi delle classi miste - esempio	p. 105
6.11 – calcolo del valore dei K _c unico di bacino (K _c bac) - esempio	p. 105
CAPITOLO 7 - IL RUSCELLAMENTO	
7.1 – intervalli della AMC e corrispondenti tipologie di CN(s)	p. 114
7.2 – fasi fenologiche delle componenti di uso del suolo	p. 117
7.3 – assegnazione delle stagioni AMC alle corrispondenti fasi fenologiche mensili delle componenti di uso del suolo	p. 117
7.4 – assegnazione limiti AMC alle varie classi	p. 118
7.5 – calcolo dei limiti INFERIORI mensili per AMC a livello di bacino – anno 2015	P. 118
7.6 – calcolo dei limiti SUPERIORI mensili per AMC a livello di bacino – anno 2015	p. 119
7.7 – limiti per AMC nel bacino SMA nell'anno 2015	p. 119
7.8 – riclassificazione dell'uso del suolo del bacino SMA secondo le classi CN USDA	p. 121
7.9 – assegnazione dei soil groups CN in funzione della litologia/copertura	p. 121
7.10 – assegnazione dei valori di CN alle classi di uso del suolo SMA	p. 122
7.11 – valori dei CN II e dei CN(s) (I, II e III) nei 4 anni di bilancio idrogeologico	p. 124
7.12 – simulazione di calcolo AMC e corrispondenti CN. I limiti sono ripresi da maggio 2015 ma le precipitazioni non sono reali	p. 125
7.13 – corrispondenza tra AMC, CN e valore del parametro B	p. 126
7.14 – un periodo di calcolo del parametro B tra gennaio e febbraio 2015	p. 127
7.15 – primo periodo del modello di calcolo del ruscellamento -anno 2015	p. 128
7.16 – secondo periodo del modello di calcolo del ruscellamento -anno 2015	p. 129
7.17 – terzo periodo del modello di calcolo del ruscellamento -anno 2015	p. 129
7.18 – terzo periodo del modello di calcolo del ruscellamento -anno 2015	p. 130
CAPITOLO 8 - LA RISERVA IDRICA DEI SUOLI, IL COEFFICIENTE DA STRESS IDRICO E LA EVAPOTRASPIRAZIONE REALE	
8.1 – orizzonti e tessitura del rilevamento ASSAM 2003	p. 135
8.2 – assegnazione degli orizzonti del profilo ASSAM 2003 a corrispondenti classi tessiturali e determinazione della riserva idrica teorica del profilo (TW)	p. 135

8.3 – calcolo profondità media delle radici e parametro p per l'anno 2015	p. 136
8.4 – calcolo della TAW dei suoli di maggiore spessore per il bacino SMA nell'anno 2014	p. 136
2.3 (ripresa dal cap. 2) – pendenza media dei depositi continentali quaternari e delle aree esterne su cui affiorano le diverse formazioni	p. 137
3.6 (ripresa dal cap. 3) – pendenza media dei principali uso del suolo del bacino SMA nel 1997, con coefficiente di acclività	p. 137
8.5 – calcolo della TAW per il 2015 mediante spazializzazione della TAW su bacino	p. 137
8.6 – valori della riserva idrica disponibile (TAW) nei 4 anni di bilancio	p. 138
CAPITOLO 9 - LA MISURA DELLE PORTATE E IL CALCOLO DEL DEFLUSSO DI BASE	
9.1 – valori annuali dei deflussi nel bacino Santa Maria degli Angeli	p. 150
9.2 – coefficienti per il calcolo del Cd di Kennessey	p. 151
9.3 – attribuzione delle aree del bacino SMA alle classi di permeabilità di Kennessey	p. 152
9.4 – applicazione del Cd Kennessey 2016 (=0,352) a tutti gli anni di bilancio	p. 152
9.5 – calcolo del coefficiente di Kennessey per il 2016 nel bacino di Santa Maria degli Angeli	p. 153
9.6 – equazioni di portata dei due bacini	p. 161
9.7 – equazioni di velocità dei due bacini	p. 162
CAPITOLO 10 - CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL BILANCIO CON ANALISI DEI RISULTATI	
10.1 – livelli minimi e massimi e corrispondente massima escursione per le 4 falde acquifere monitorate	p. 167
10.2 – attribuzione di classi di permeabilità e coefficienti di infiltrazione potenziale (CIP) in base alle formazioni geologiche o ai depositi quaternari	p. 168
10.3 – calcolo dell'infiltrazione efficace a livello di bacino e confronto con la percolazione profonda	p. 169
10.4 – valori mensili dei parametri del bilancio fenologico, del deflusso misurato e dell'andamento delle falde superficiali. Anni 2014 e 2015	p. 170
10.5 – valori mensili dei parametri del bilancio fenologico, del deflusso misurato e dell'andamento delle falde superficiali. Anni 2015 e 2016	P. 171
10.6 – riepilogo dei valori annuali del bilancio fenologico e del deflusso di base misurato	p. 172

Indice delle equazioni	
CAPITOLO 4 - IL BILANCIO IDROGEOLOGICO SU BASE FENOLOGICA	
4.1 – bilancio idrogeologico completo di una data area	p. 49
4.2 – bilancio mensile e annuale di un bacino	p. 49
4.3 – bilancio pluriennale di un bacino	p. 50
4.4 – bilancio idrogeologico giornaliero su base fenologica	P. 59
<i>differenti equazioni per la stima della AET annuale (inserito tra le figure, ma si tratta di equazioni)</i>	p. 63
4.5 – equazione di Zhang	p. 65
CAPITOLO 5 - STIMA E ANALISI DELLE PRECIPITAZIONI E DELLA EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE (ET₀) E CORREZIONE CON IL COEFFICIENTE DI ACCLIVITA'	
5.1 – equazione di Penman Monteith	p. 70
CAPITOLO 6 – L'EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE CULTURALE (ET_c) NEL BACINO	
6.1 – equazione dell'evapotraspirazione reale come prodotto di ET ₀ e di vari coefficienti	p. 78

6.2 – equazione del Kc	p. 81
6.3 – Kc nelle fasi di sviluppo e finali	p. 82
6.4 – correzione climatica dei coefficienti	p. 83
6.5 – calcolo del coefficiente da terreno nudo per eventi di media grandezza	p. 88
6.6 – calcolo del Kc mid per il bosco	p. 96
6.7 – calcolo del Kcb mid per il bosco	p. 97
6.8 – calcolo del Kcb full per il bosco	p. 97
CAPITOLO 7 - IL RUSCELLAMENTO	
7.1 – valore di CN in funzione di S	p. 113
7.2 – valore di S in funzione di CN	p. 113
7.3 – valore di S in funzione di CN (se Pa è espressa in <i>inches</i>)	p. 113
7.4 – initial abstraction	p. 113
7.5 – valore di Q (runoff)	p. 114
7.6 – calcolo di S2s (Williams)	p. 124
7.7 – calcolo di CN I (Williams)	p. 124
7.8 – calcolo di CN III (Williams)	p. 124
7.9 – calcolo del parametro S in modo continuo (williams)	p. 125
CAPITOLO 8 - LA RISERVA IDRICA DEI SUOLI, IL COEFFICIENTE DA STRESS IDRICO E LA EVAPOTRASPIRAZIONE REALE	
8.1 – calcolo della total available water (TAW)	p. 132
8.2 – calcolo della rapidly available water (RAW)	p. 133
8.3 – calcolo del parametro p	p. 133
8.4 – calcolo del coefficient da stress idrico (Ks)	p. 133
8.5 – calcolo della EVAPOTRASPIRAZIONE REALE (ETcR)	p. 133
CAPITOLO 9 - LA MISURA DELLE PORTATE E IL CALCOLO DEL DEFLUSSO DI BASE	
9.1 – calcolo della portata (Q)	p. 140
9.2 – calcolo della portata nella sottosezione <i>sezione (mean section method UNI EN ISO 748:2008)</i>	p. 141
9.3 – calcolo del deflusso (mm) a livello di bacino a partire dalle misure delle portate (m ³ /secondo)	p. 149
9.4 – calcolo dell'indice di aridità (Kennessey)	p. 151
9.5 – relazione tra velocità media della sezione e velocità massima superficiale (bacino Santa Maria)	p. 160
9.5 – relazione tra velocità media della sezione e velocità massima superficiale (bacino medio-alto Metauro)	p. 160
Tab. 9.6 e 9.7 – equazioni di portata e di velocità dei due bacini	p. 161

BIBLIOGRAFIA

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and M. Smith (1998), *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper n°56*

Allen, R.G. (2000), *Using the FAO 56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study*, *Journal of Hydrology* 229 (2000) 27-41

Armiraaglio, S., Cerabolini, B., Gandellini, F., Gandini, P., and C. Andreis (2003), *Calcolo informatizzato del bilancio idrico del suolo*, «Natura Bresciana» Ann. Mus. Civ. Sc. Nat., Brescia, 33, 2003: 209-216

Autorità di bacino del Fiume Arno (2008), *Progetto di Piano di Bacino Stralcio "Bilancio idrico" – Relazione di Piano*

Autorità di bacino della Puglia (2010) *Aggiornamento del Bilancio Idrogeologico dei Corpi Idrici sotterranei della Regione Puglia - Studio di fattibilità "Bilancio Idrico Potabile" Allegato 4.3 alla Relazione finale*

Bartolucci, D., (2011) *Studio idrometrico del flusso di base e ricarica del Candigliano*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo"

Cavitolo, P. (2014), *Valutazione delle potenzialità delle risorse idriche nella Provincia di Pesaro Urbino e scenari di sostenibilità in relazione al bilancio idrico provinciale*, Tesi di dottorato in Scienze della Terra, Università degli studi di Urbino "Carlo Bo"

Claessens, L., C. Hopkinson, E. Rastetter, and J. Vallino (2006), *Effect of historical changes in land use and climate on the water budget of an urbanizing watershed*, *Water Resour. Res.*, 42, W03426, doi:10.1029/2005WR004131

Cristea, N.C., Kampf S.K., and S.J.Burges (2013), *Linear models for estimating annual and growing season reference evapotranspiration using averages of weather variables*, *Int. J. Climatol.* 33: 376–387 (2013)

De Luca, D., *Applicazione a scala nazionale per l'Italia del modello idrologico SWAT*, tesi di dottorato di ricerca, Università degli Studi della Tuscia

Eccel, E., Toller, G., Ghielmi, L., Salvadori, C., and N. La Porta (2007), *Assessment of a water balance in a deciduous alpine forest*, *Italian Journal of Agrometeorology* 32 - 43 (1) 2007

Farina, D. (2013), *Analisi idrogeologica e valutazione delle risorse idropotabili della provincia di Pesaro Urbino utilizzabili secondo criteri di sostenibilità ambientali*, Tesi di dottorato in Scienze della Terra, Università degli studi di Urbino "Carlo Bo"

Garofalo, P., Rinaldi, M., Maddaluno, C., and A.V. Vonella (2011), *Verifica dei coefficienti colturali (Kc) su colture erbacee in una pianura del Sud-Italia*, Conference paper

Gori, S. (2004), *Valutazione della pericolosità di frana attraverso analisi di foto aeree e in relazione alle condizioni di innesco in un'area nel comune di Urbino*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo"

Gruppo di lavoro del dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli studi di Siena (coord. Barazzuoli, P., Rigati, R.), (2004), *Studio per la definizione del bilancio idrico ed idrogeologico del bacino del Fiume Magra – Relazione finale*

Donohue, R.J., Roderick, M.L., and T.R. McVicar (2012), *Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model*, *Journal of Hydrology* 436–437 (2012) 35–50

Gassmann, M., Gardiol, J., and L. Serio (2011), *Performance evaluation of evapotranspiration estimations in a model of soil water balance*, *Meteorol. Appl.* 18: 211–222 (2011)

Gerrits, A. M. J., H. H. G. Savenije, E. J. M. Veling, and L. Pfister (2009), *Analytical derivation of the Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple evaporation model*, *Water Resour. Res.*, 45, W04403, doi:10.1029/2008WR007308

Giannakopoulos, C. et al., *Climate change impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global temperature rise*, A report for WWF (2005)

Giannakopoulos, C., et al., *Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming*, *Glob. Planet. Change* (2009), doi:10.1016/j.gloplacha.2009.06.001

Hawkins R.H. et al. (2002), *Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio*

Hurkmans, R. T. W. L., W. Terink, R. Uijlenhoet, E. J. Moors, P. A. Troch, and P. H. Verburg (2009), *Effects of land use changes on streamflow generation in the Rhine basin*, *Water Resour. Res.*, 45, W06405, doi:10.1029/2008WR007574

International Standard ISO 1100-2: 1998 – *Hydrometry – Measurements of liquid flow in open channels Part2: Determination of the stage-discharge relationship*

IPCC, 2014: *Summary for policymakers*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32

Jiménez Cisneros, B.E., T. Oki, N.W. Arnell, G. Benito, J.G. Cogley, P. Döll, T. Jiang, and S.S. Mwakalila, 2014: *Freshwater resources*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.

Lazzara, P., Rana, G., *The crop coefficient (Kc) values of the major crops grown under Mediterranean climate*

Marin, F.R., Angelocci L.R., Nassif D.S.P., Costa L.G., Vianna M.S., and K.S. Carvalho (2016) *Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops*, *Agricultural Water Management* 163 (2016) 139–145

McRae, Stuart G. (1991), *Pedologia pratica – come studiare I suoli sul campo*, Zanichelli

Montaldo, N., Albertson, J.D., and M. Mancini (2008), *Vegetation dynamics and soil water balance in a water-limited Mediterranean ecosystem on Sardinia, Italy*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 1257–1271, 2008

Osservatorio Permanente sul Sistema Agroalimentare dei Paesi del Mediterraneo (2009), *Cambiamenti climatici e risorse idriche nella regione mediterranea*, ISMEA IAMB luglio 2009

Regione autonoma Friuli Venezia Giulia, Piano Regionale di tutela delle acque

Peel, M. C., T. A. McMahon, and B. L. Finlayson (2010), *Vegetation impact on mean annual evapotranspiration at a global catchment scale*, *Water Resour. Res.*, 46, W09508, doi:10.1029/2009WR008233.

Ponce, V.M., and Hawkins, R.H. (1996) *Runoff Curve Number: has it reached maturity?* *Journal of Hydrological Engineering/January 1996*

Potter, N. J., L. Zhang, P. C. D. Milly, T. A. McMahon, and A. J. Jakeman (2005), *Effects of rainfall seasonality and soil moisture capacity on mean annual water balance for Australian catchments*, *Water Resour. Res.*, 41, W06007, doi:10.1029/2004WR003697

Pranzini, G. (2009), *Le acque sotterranee*, Pitagora Editrice Bologna

Soil and water assessment tool (SWAT), *Theoretical Documentation version 2009*

Kannan, N., Santhi, C., Williams, J.R., and J.G. Arnold (2007), *Development of a continuous soil moisture accounting procedure for curve number methodology and its behavior with different evapotranspiration methods*, *Hydrological Processes* (2007) DOI: 10.1002/hyp6811

Kurnik, B., Kajfez-Bogataj, L., and Stephanie Horion (2015), *An assessment of actual evapotranspiration and soil water deficit in agricultural regions in Europe*, *Int. J. Climatol.* 35: 2451–2471 (2015)

Silveira, L., Charbonnier, F., and J.L. Genta (2000), *The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure*, *Hydrological Sciences*, 45(i) February 2000

Taurino, L. (2004), *Un sistema informativo territoriale per l'analisi della propensione al dissesto dei versanti dell'area urbinata*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo"

UNI EN ISO 748 dell'aprile 2008 – *Misurazione della portata di liquidi in canali aperti mediante correntometri o galleggianti*

USDA NRCS (2004) *Part 630 – Hydrology National Engineering Handbook*

University of California Cooperative Extensions CDWR (2000), *A guide to estimating water needs of landscape plantings in California – the landscape coefficient method and WUCOLS III*

Williams, J.R., Kannan, N., Wang, X., Santhi, C., and J.G. Arnold (2012), *Evolution of the SCS Runoff Curve Number and its application to continuous runoff simulation*, Journal of Hydrologic Engineering · November 2012 DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000529

Xu, C.Y., and V.P. Singh (1998), *A Review on Monthly Water Balance Models for Water Resources Investigations*, Water Resources Management **12**: 31–50, 1998

Zhang, L., Dawes, W.R., and G.R. Walker (1999), *Predicting the effects of vegetation changes on catchment average water balance*, Technical Report 99/12, November 1999

Zhang, L., Dawes, W.R., and G.R. Walker (2001), *Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale*, Water Resources Research, vol. 37, NO.3, pages 701-708

Zhang, L., K. Hickel, W. R. Dawes, F. H. S. Chiew, A. W. Western, and P. R. Briggs (2004), *A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration*, Water Resour. Res., 40, 02502, doi:10.1029/2003WR002710.

Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y., and Q. Shao (2008), *Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework – Model development and testing*, Journal of Hydrology (2008) 360, 117– 131



I primi rilevamenti a Bivio Borzaga, con una ruota di bicicletta modificata per misurare la velocità superficiale dell'acqua. Dopo un po' è arrivato il mulinello idrometrico...per fortuna!

Foto novembre 2012, Bivio Borzaga, Fermignano (PU). Fosso di Santa Maria degli Angeli.