

Il problema del bilancio nella modellazione idrogeologica: Intervento introduttivo

Dr. Daniela Valigi

Dipartimento di Fisica e Geologia – Università degli Studi di Perugia

Perugia, 7 novembre 2019



CReIAMO PA

Per un cambiamento sostenibile



Definizioni di bilancio idrologico e idrico

ALLEGATO 1 LINEE GUIDA PER LA PREDISPOSIZIONE DEL BILANCIO IDRICO DI BACINO
(art. 22, comma 4, del D.Lgs. 11 maggio 1999, n. 152) – D.M. del 28 luglio 2004

- «**Bilancio idrologico**: comparazione, nel periodo di tempo considerato e con riferimento ad un determinato bacino o sottobacino, superficiale o sotterraneo, tra afflussi e deflussi naturali, ovvero deflussi che si avrebbero in assenza di pressione antropica».
- «**Bilancio idrico**: comparazione, nel periodo di tempo considerato, fra le risorse idriche (disponibili o reperibili) in un determinato bacino o sottobacino, superficiale o sotterraneo, al netto delle risorse necessarie alla conservazione degli ecosistemi acquatici ed i fabbisogni per i diversi usi (esistenti o previsti)».
- Il bilancio deve essere quindi ricostruito con riferimento sia alle condizioni naturali sia a quelle modificate per effetto degli usi antropici attuali o di piano di tutela delle acque.



Il bilancio idrologico deve permettere di:

- *Valutare la disponibilità delle risorse idriche, al netto delle risorse necessarie alla conservazione degli ecosistemi acquatici, e della compatibilità con gli usi delle acque;*
- *Analizzare e comprendere le interazioni con lo stato di qualità dei corpi idrici;*
- *Sviluppare scenari di gestione delle risorse idriche compatibili con la tutela qualitativa e quantitativa.*



Equazione generale del bilancio

$$\sum I + \sum U = \pm \Delta R$$

DEFINIZIONE DEL SISTEMA

- *E' necessario definirne la geometria e quindi i contorni del corpo idrico sotterraneo*

INTERVALLO TEMPORALE

- *medio annuo*
- *annuo*
- *stagionale*
- *mensile*
- *giornaliero*



Termini principali del bilancio idrogeologico

$$\sum I$$

Ingressi

- Piogge (P)
- Ingressi artificiali (I_{art})
- Ingressi sotterranei (I_{sott})

$$\sum U$$

Uscite

- Evapotraspirazione reale (ETR)
- Portate di corsi d'acqua e/o sorgenti
- Uscite artificiali: prelievi per uso irriguo, industriale ed idropotabile (U_{art})
- Uscite sotterranee (U_{sott})

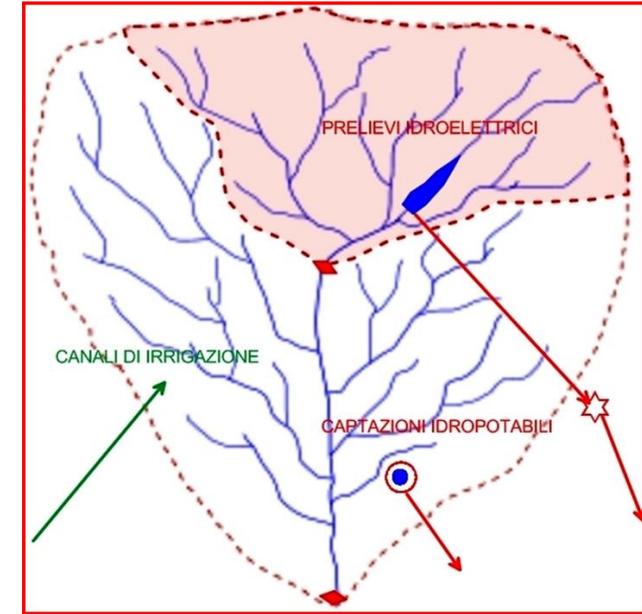
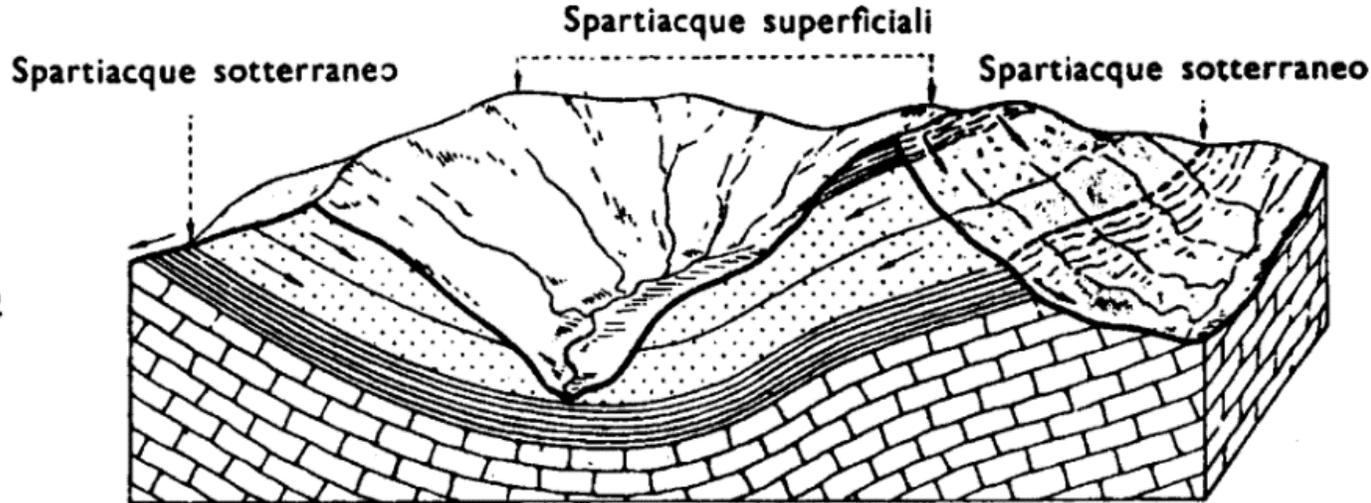


Il bilancio può aiutare a comprendere se il bacino idrogeologico è diverso da quello idrografico

Equazione del bilancio idrogeologico

$$\Sigma I = \Sigma U \pm \Delta R \quad (\pm \Delta R = 0 \text{ per periodi lunghi})$$

$$P + I_{\text{art}} + I_{\text{sott}} = ETR + D + U_{\text{art}} + U_{\text{sott}}$$



quando $I_{\text{sott}} \neq U_{\text{sott}}$

Se $I_{\text{sott}} > U_{\text{sott}}$

bacino idrogeologico > bacino idrografico

Figura III.1

Fonte: Desio A., *Geologia applicata all'ingegneria*, 1973.



CReIAMO PA

Come stimare l'infiltrazione efficace (I_{eff})?

$$P - \text{ETR} = \text{ECC}$$

P= pioggia

- ETR = evapotraspirazione reale
- ECC = eccedenza idrica

$$\text{ECC} = I_{\text{eff}} + R$$

- I_{eff} = Infiltrazione efficace che alimenta gli acquiferi
- R = Ruscellamento

Per il calcolo di I_{eff} si ricorre generalmente a due diversi metodi.



1. Metodo «diretto» (Boni et al., 1986)

1. Richiede un'approfondita conoscenza geologico – strutturale del sistema.

2. Presuppone che la struttura sia idraulicamente chiusa con limiti a flusso nullo che la delimitano.

3. Misura della portata complessiva di tutte le emergenze naturali (puntuali e lineari) Q_{tot} che emergono dalla struttura.

4. Stima dell'area di ricarica ($=A$)

5. Stima dell'infiltrazione efficace (I_{eff})

$$I_{eff} = Q_{tot}/A$$

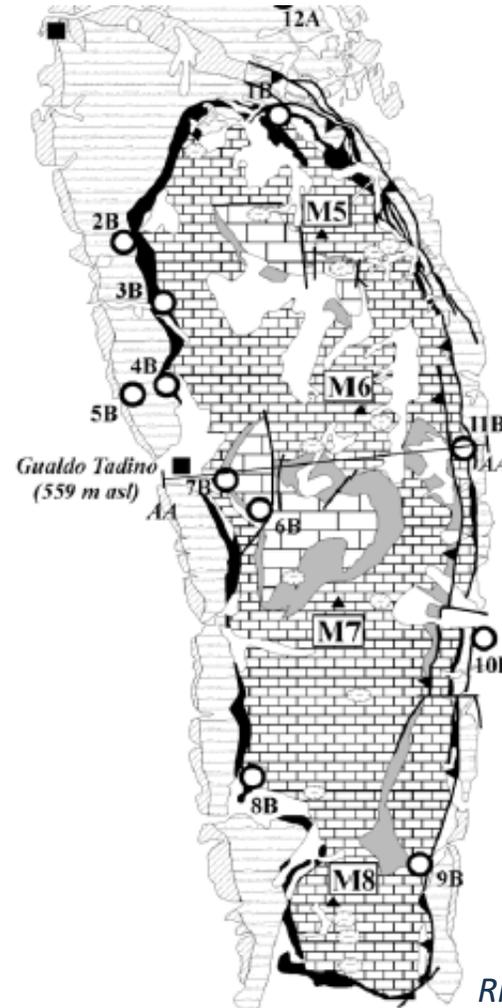


1. metodo «diretto»

Struttura dei Monti di Gualdo

1. Delimitazione dell'area della struttura con individuazione dei limiti a flusso nullo costituito dal Complesso a bassa permeabilità delle Marne a Fucoidi (Area di ricarica = A).
2. Misura della portata di tutte le emergenze naturali (puntuali e lineari) (= Q_{tot}).
3. Stima dell'Infiltrazione efficace

$$I_{eff} = Q_{tot}/A$$



Bilancio medio annuo

Sorgente	Q naturali (L/s)
1B Sorgente Giano	31.9
2B Sorgente P. Mancinelli	44.1
3B Sorgente Vaccara	99.1
4B Sorgente Cappuccini	19.5
5B Sorgente Rumore	119.8
6B Sorgente S. Marzio	86.8
7B Sorgente Rocchetta	16.5
8B Sorgente Boschetto	119.4
9B Sorgente Capodacqua	102.8
10B – Sorgente Torre/S.M. Maddalena	30
11B – Sorgente Belvedere/Montenero	109.2
Portata totale delle sorgenti	779.1

Ripresa da Cambi et al., 2006

Ripresa da Cambi et al., 2010



1. Metodo «diretto»

Struttura dei Monti di Gualdo

1. Portata totale sorgenti; $Q_{\text{tot}} = 779.1 \text{ L/s} = 24.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$

2. Area di Ricarica; $A = 50 \text{ km}^2 = 50 \cdot 10^6 \text{ m}^2$

3. $I_{\text{eff}} = Q_{\text{tot}}/A$

$$I_{\text{eff}} = 24.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno} \cdot 1000 / 50 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 491 \text{ mm/anno}$$



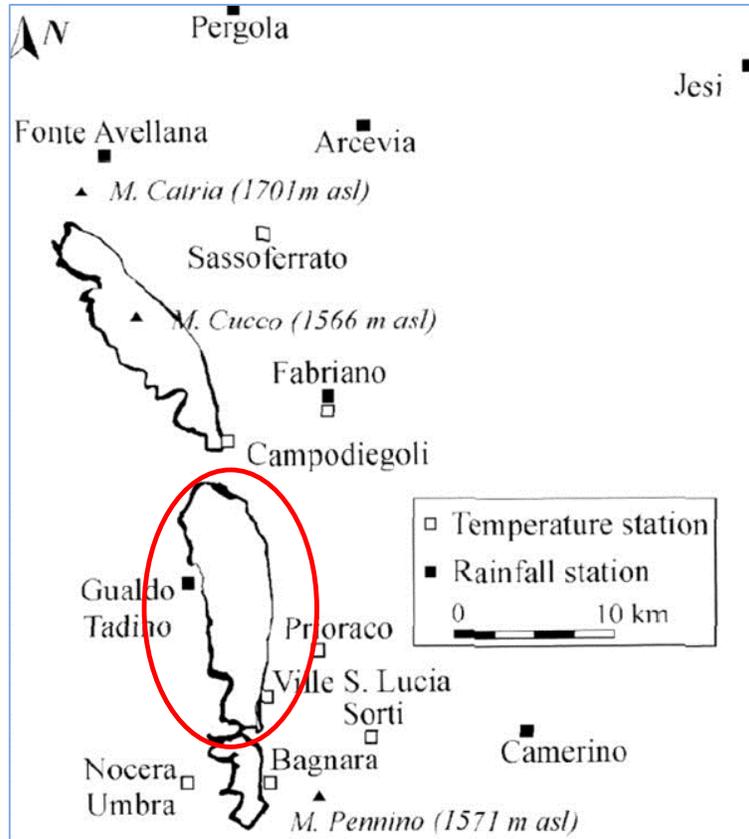
2. Metodo «indiretto» (tramite bilancio idrogeologico)

1. Stima della precipitazione e temperatura medie annue in funzione della quota dell'area di ricarica.
2. Stima dell'evapotraspirazione reale ETR media annua.
3. Stima dell'eccedenza idrica media annua: $ECC = P - ETR$.
4. Stima dell'Infiltrazione efficace media annua: $I_{eff} = ECC * C.I.P. (= \chi)$

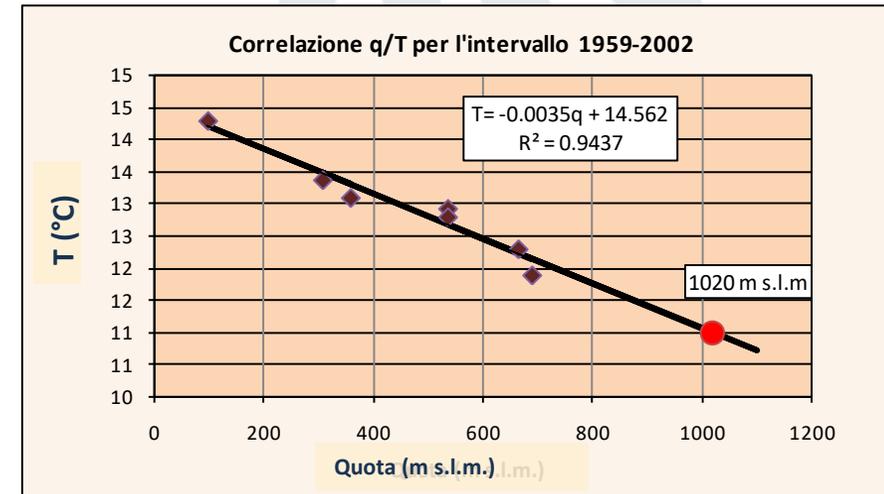
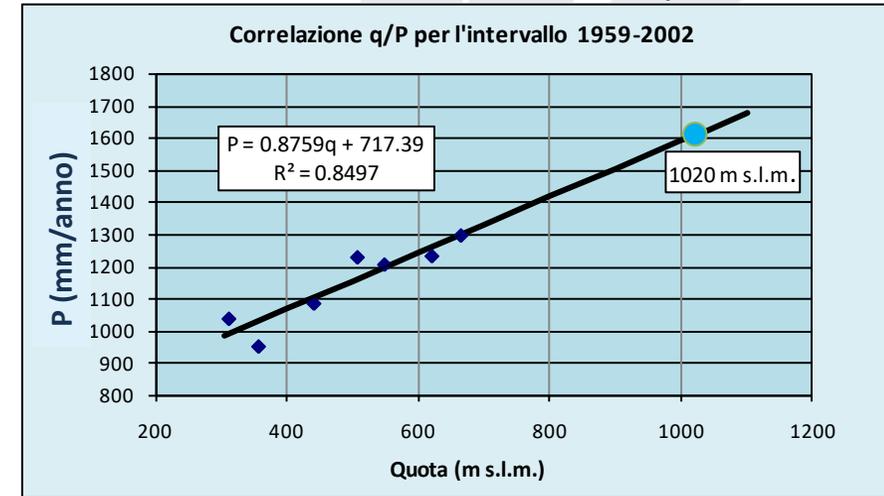


2. Metodo «indiretto» Struttura dei Monti di Gualdo

1. Stima della precipitazione e temperatura medie annue



$$P = 0.8759 \cdot 1020 + 717.39 = 1611 \text{ mm/anno}$$

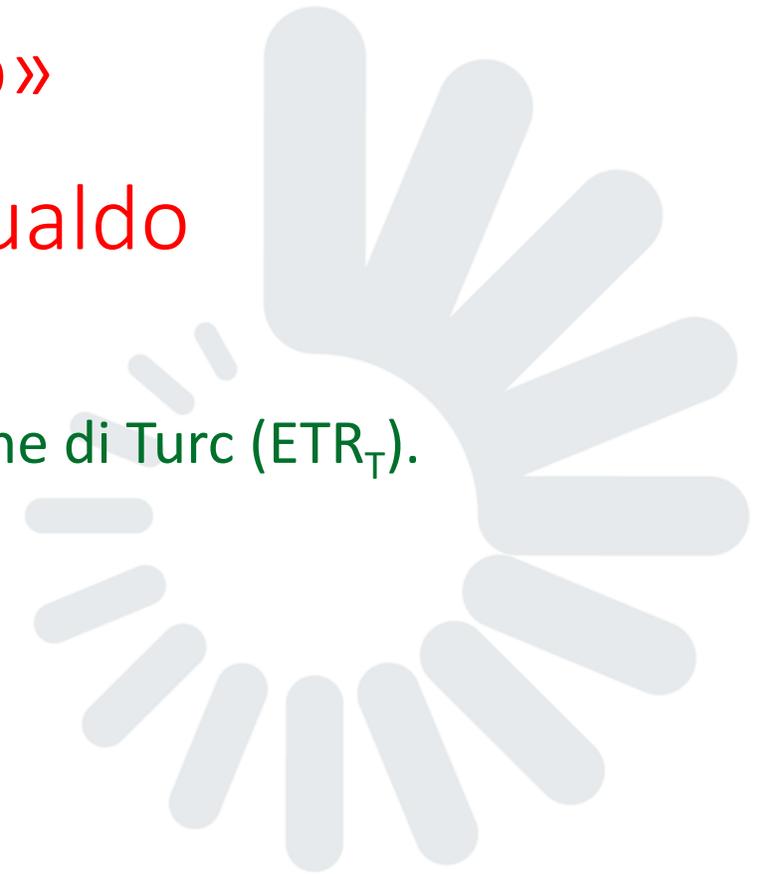


$$T = -0.0035 \cdot 1020 + 14.562 = 11.0 \text{ °C}$$



2. Metodo «indiretto»

Struttura dei Monti di Gualdo



2. Stima dell'evapotraspirazione media annua con l'equazione di Turc (ETR_T).

$$ETR_T \text{ (mm/anno)} = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

- dove:
- ETR_T (mm/anno) = Evapotraspirazione media annua con Turc ($ETR_{T(1959-2002)} = 600$ mm/anno);
- P (mm/anno) = Pioggia media annua ($P_{(1959-2002)} = 1611$ mm/anno);
- $L = 300 + 25T + 0.05T^3$
- con T (°C) = Temperatura media annua ($T_{(1959-2002)} = 11.0$ °C).



2. Metodo «indiretto»

Struttura dei Monti di Gualdo

3. Stima dell'eccedenza idrica media annua:

$$ECC = P - ETR_T = 1611 \text{ mm/anno} - 600 \text{ mm/anno} \sim 1000 \text{ mm/anno}$$

$$ECC = I_{\text{eff}} + R$$

$$I_{\text{eff}} = ?$$



2. Metodo «indiretto»

Struttura dei Monti di Gualdo



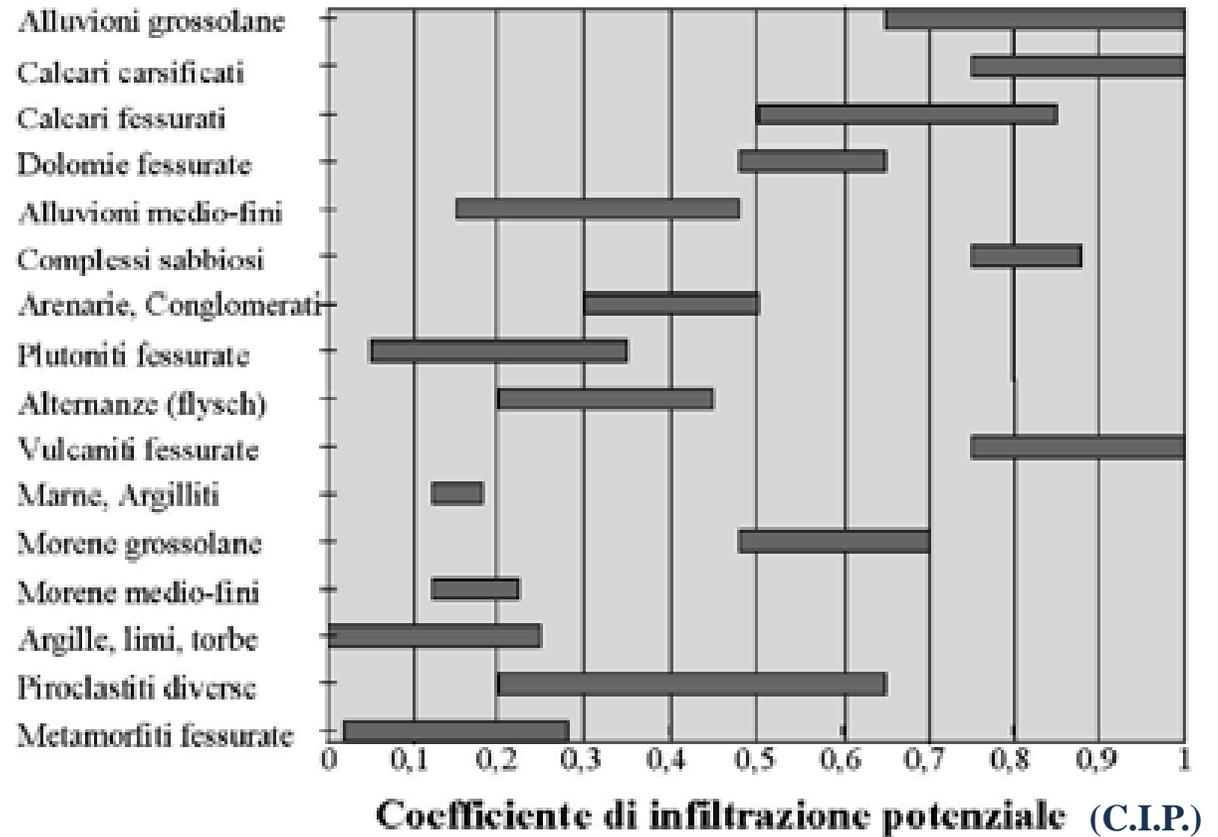
4. Stima dell'Infiltrazione efficace media annua:

E' stato attribuito un C.I.P. medio = 0.7 per il Complesso calcareo fessurato della Maiolica che affiora per il 96% della sua area di ricarica.

Cioè il 30% di ECC defluisce superficialmente.

$$I_{\text{eff}} = \text{ECC} * \text{C.I.P.} \sim 700 \text{ mm/anno}$$

Complessi idrogeologici



Confronto dei valori di I_{eff} calcolati con i due metodi Struttura dei Monti di Gualdo

- $I_{\text{eff}} (= Q_{\text{tot}}/A) = 491 \text{ mm/anno}$ *1. Metodo diretto*
- $I_{\text{eff}} (\text{ECC} * \text{C.I.P.} = 0.7) = 700 \text{ mm/anno}$ *2. Metodo indiretto*
- Quali possono essere i motivi di questa grande differenza?
- Che valore dovrebbe avere il C.I.P. per avere stime di I_{eff} uguali?



CALCOLO DEL C.I.P. MEDIO

Struttura dei Monti di Gualdo

$$\text{C.I.P.} = Q_{\text{tot}}/\text{ECC} = \\ (491 \text{ mm/anno})/(1011 \text{ mm/anno}) = 0.49$$

- Infiltrazione efficace = 49% anziché al 70% di ECC.
 - Questo valore sembra essere basso per il Complesso della Maiolica che in quest'area ha un alto grado di fessurazione.



La differenza nei risultati può essere dovuta a:

1. Incertezza nella misura delle portate delle sorgenti che bordano la struttura: non tutte le sorgenti sono monitorate in continuo e quelle misurate in discreto hanno poche misure; le portate potrebbero essere sottostimate.
2. Incertezza nella stima della pioggia ragguagliata alla quota media della struttura: l'utilizzo di una relazione lineare potrebbe portare ad sovrastima delle piogge ragguagliate.
3. I dati di T e P e Q non sono sempre riferiti allo stesso periodo di misura.
4. Errore nella definizione dell'area di ricarica: la struttura potrebbe non essere chiusa per la presenza di un flusso regionale.
5. Non validità della formula di Turc in quest'area per la stima di ETR.



Verifica della validità dell'equazione di Turc

$ETR_T \cong ETR$ stimata con il bilancio idrogeologico su bacini a bassa permeabilità ($I_{eff} \cong 0$)

River and time period	Area (km ²)	P _a (mm)	T _a (°C)	ETR _T (mm)	ETR (mm)
Reno at Pracchia 1956-1962 1965-1969 1970-1997	41.0	2040	10.2	586	590
Reno at Molino 1956-1961 1965-1969	89.2	2063	10.0	580	577
Limentra 1956-1960 1970-1973	64.6	1709	8.8	529	488
Nestore 1986-1992	106.3	700	13.4	528	524
Rigalto 1987-1992	17.0	737	13.6	545	556
Rio Acquina 1985-1988	10.7	974	11.9	568	543

ETR_T ed ETR ($P-D$) in bacini a bassa permeabilità con $I_{eff} \cong 0$. (Dragoni & Valigi, 1994; Valigi 1995; Di Matteo et al., 2006).

ETR: Evapotraspirazione media annua stimata con l'equazione del bilancio idrologico: su lungo periodo ($\Delta R = 0$) e con $I_{eff} = 0$:

$$ETR = P - D$$

P = Pioggia media annua (mm/anno)

D = Portata media annua del corso d'acqua (mm/anno)

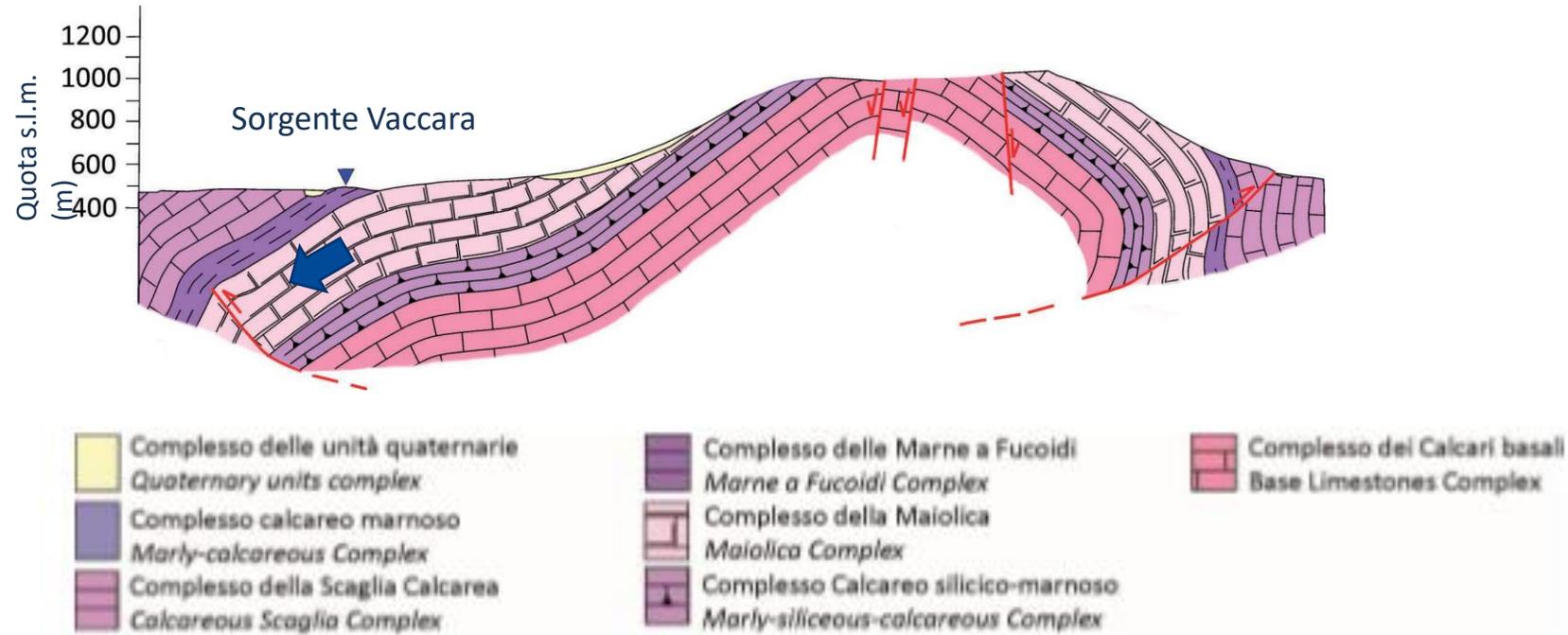
ETR_T = Evapotraspirazione reale media annua stimata con la formula di Turc.

Poiché ETR è circa uguale ad ETR_T , si può ritenere la formula di Turc abbastanza affidabile per la stima dell'evapotraspirazione media annua.

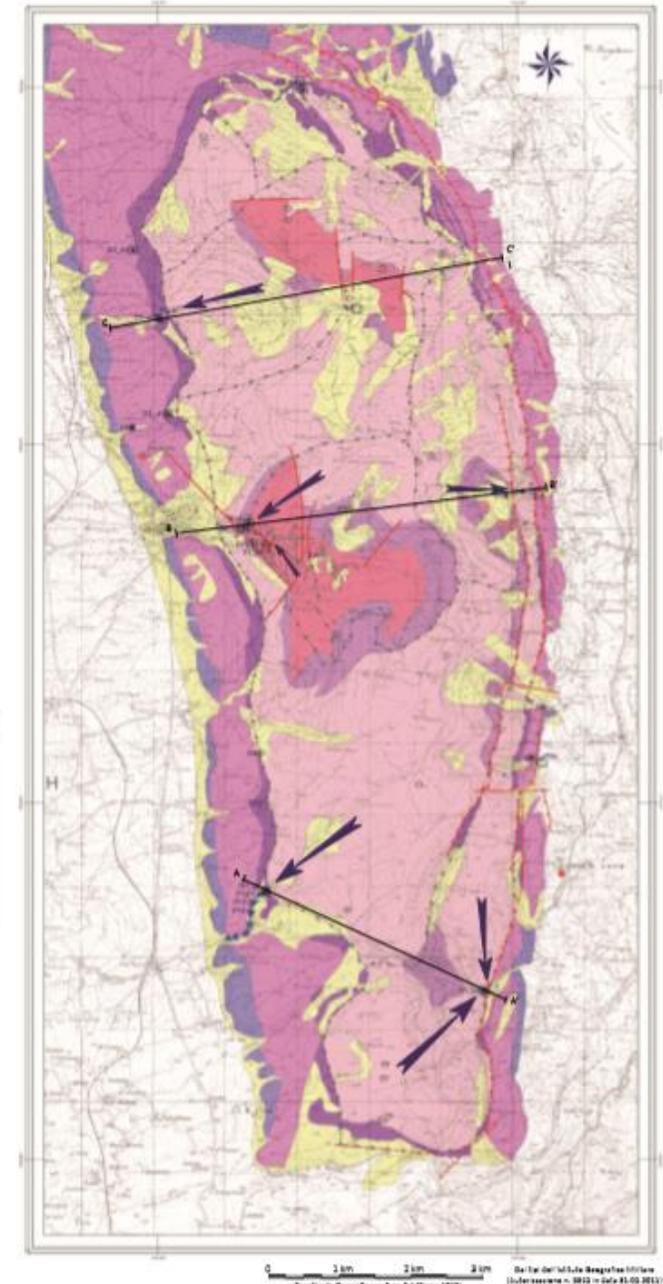


4. Presenza di un flusso regionale?

CARTA IDROGEOLOGICA DEI MONTI DI GUALDO UMBRIA NORD-ORIENTALE Bilancio idrogeologico dei complessi giurassici e cretaceo inferiori (Cambi et al., 2006)



Una parte di acqua che si infiltra nella struttura delimitata dal Complesso delle Marne a Fucoidi ($A = 50 \text{ km}^2$) può infiltrarsi in profondità e alimentare corpi idrici esterni alla struttura.



Bilancio della struttura di Monte Cucco

Periodo 1959-2002	Maiolica	Calcere Massiccio + Corniola	Tutta la struttura
A (km ²)	37.16	5.91	43.07
quota (m s.l.m.)	892	1069	
T (°C)	11.4	10.8	
P (mm/anno)	1497	1651	1518 ≈ 65 Mm ³ /anno
ETR _T (mm/anno)	608	594	606 ≈ 26 Mm ³ /anno
ECC (mm/anno)	889	1057	912 ≈ 39 Mm ³ /anno
R (mm/anno)	267	53	238 ≈ 10 Mm ³ /anno
I_{eff} (mm/anno)	622	1004	674 ≈ 29 Mm³/anno
Q_{tot} sorgenti	608.3 L/s = 446 mm/anno = 19 Mm³/anno		

Bilancio idrogeologico
medio annuo
Periodo: 1959 – 2002

$$I_{\text{eff}} = 34\% \text{ in più di } Q_{\text{tot}}$$

Complesso della Maiolica C.I.P. = 0.70

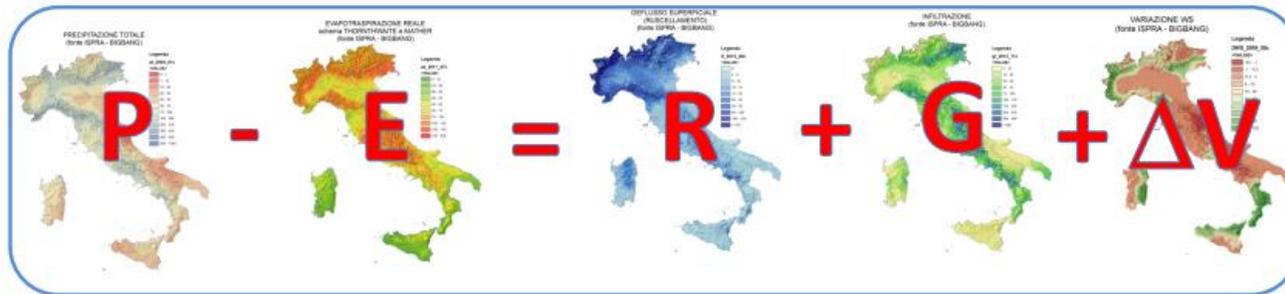
Complesso dei Calcari Basali (Corniola + Calcere Massiccio) C.I.P. = 0.95



CReIAMO PA

Progetto Regione Umbria: Piano Ambientale 2006

2. Metodo indiretto: Bilancio idrologico nazionale mediante la procedura GIS BIGBANG (Braca et al., 2018; Braca & Ducci, 2018)

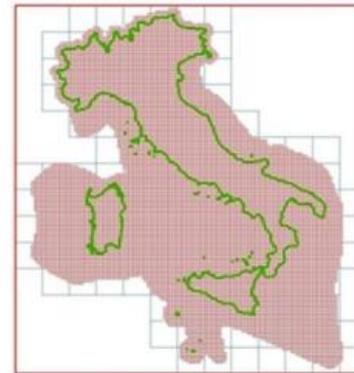
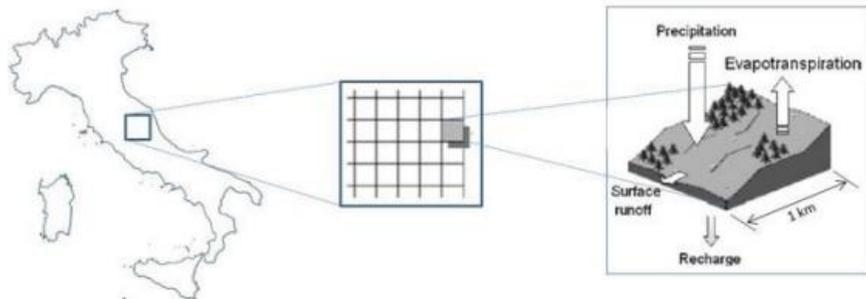


$$G = I_{\text{eff}}$$

E = ETR = evapotraspirazione reale è stimata mediante un bilancio mensile del suolo con Thornthwaite e Mather (1955)

Le variabili idrologiche precipitazione totale (**P**), evapotraspirazione reale (**E**), scorrimento superficiale (**R**), ricarica degli acquiferi (**G**) e immagazzinamento di volumi idrici nel suolo (ΔV) sono valutate su ciascuna box del grigliato definito dall'EEA di passo 1 km (DATUM ETRS89, proiezione *Lambert Azimuthal Equal Area*).

Uso della carta dei suoli dell'ISPRA
ISPRA (Munafò et al., 2013) sulla base dei prodotti del sistema satellitare di osservazione terrestre Copernicus.



BIGBANG è implementato in ambiente ESRI ArcGIS 10.1, utilizzando il linguaggio Python

Bilanci a diversa scala temporale

Braca, G. et al., 2018: Evaluation of national and regional groundwater resources under climate change scenarios using a GIS-based water budget procedure. XVIII Giornata Mondiale dell'Acqua, Lincei.

Braca, G., e Ducci, D., 2018: Development of a GIS Based Procedure (BIGBANG 1.0) for Evaluating Groundwater Balances at National Scale and Comparison with Groundwater Resources Evaluation at Local Scale. In *Groundwater and Global Change in the Western Mediterranean Area*, Springer.

BILANCIO IDROGEOLOGICO A SCALA MENSILE

Uso di un modello che si basa su il metodo di bilancio di Thornthwaite-Mather (1955) per la stima di ETR ed ECC
(*Dragoni et al., 2015*)

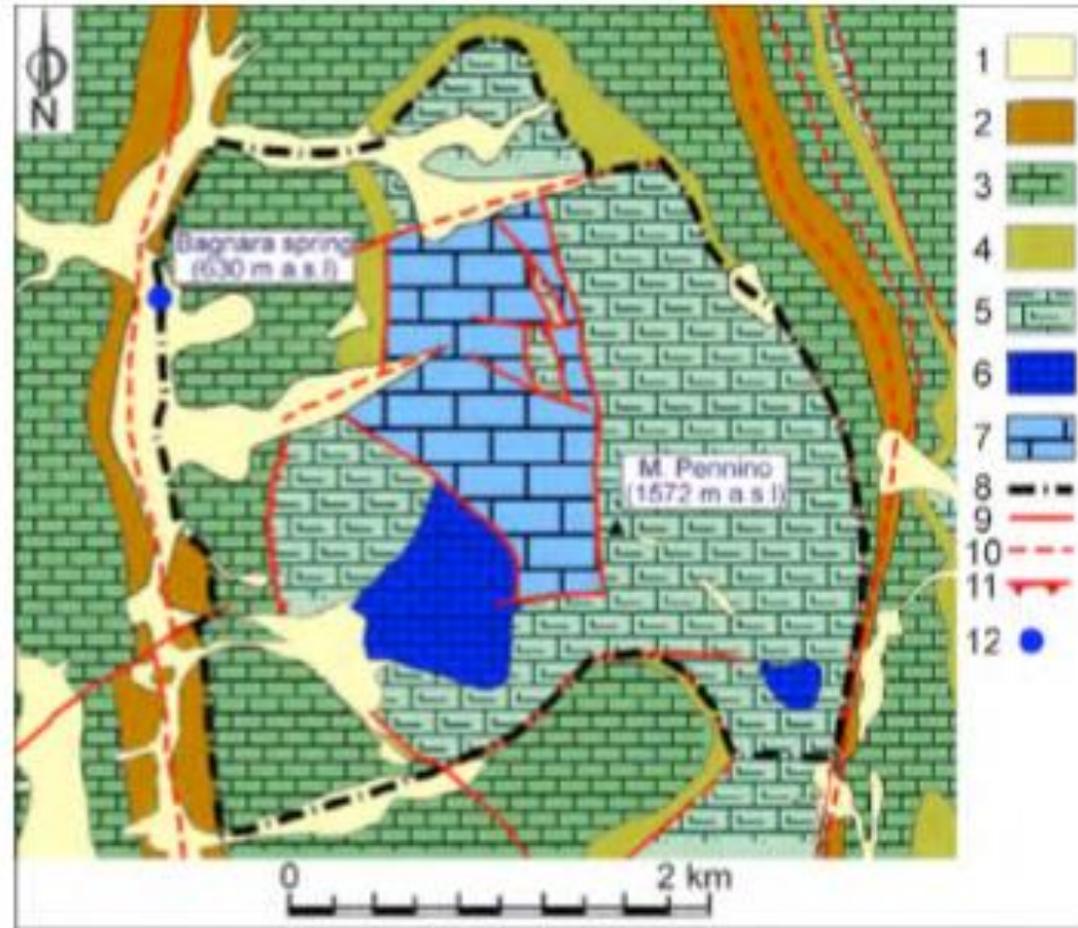
Il metodo è applicabile solo a sistemi idrogeologici caratterizzati dalla presenza di suolo.

Dati necessari:

- Piogge e temperature mensili riferite ad un certo intervallo temporale;
- Stato di umidità iniziale del suolo;
- Caratteristiche lito-pedologiche;
- Capacità di ritenzione massima del suolo;
- Latitudine.



Modellizzazione a scala mensile della sorgente di Bagnara



Carta dei complessi idrogeologici della Sorgente di Bagnara (PG)

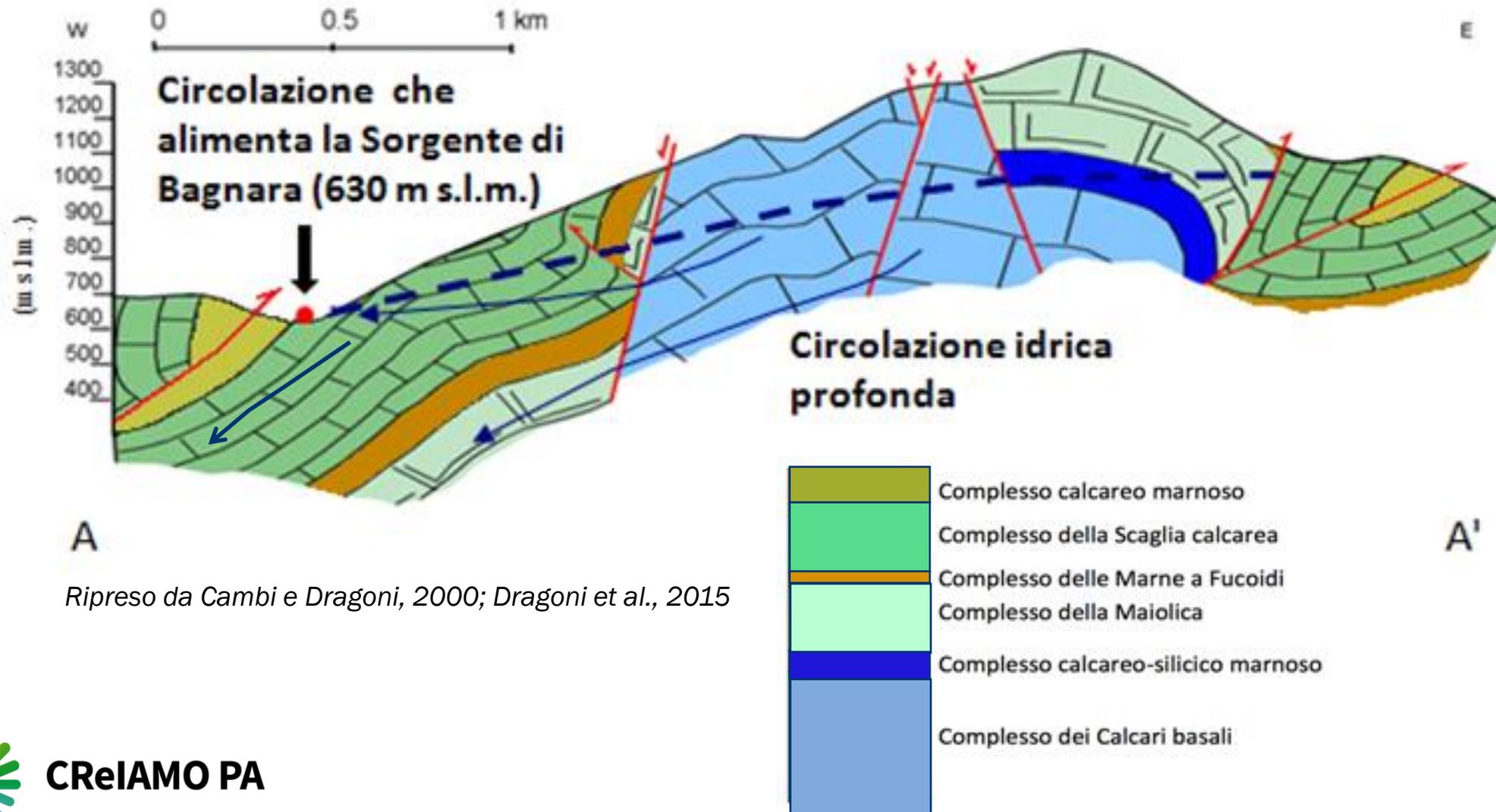
- 1) Depositi alluvionali
- 2) Scaglia variegata and cinerea (bassa permeabilità),
- 3) Scaglia s.l. (medio-alta permeabilità),
- 4) Marne a Fucoidi (bassa permeabilità),
- 5) Maiolica (alta permeabilità),
- 6) Formazioni giurassiche (medio-alta permeabilità),
- 7) Calcarea Massiccio (alta permeabilità),
- 8) **Area di ricarica,**
- 9) faglia, 10) faglia presunta, 11) thrust,
- 12) Sorgente di Bagnara

Ripresa da *Dragoni et al., 2015*

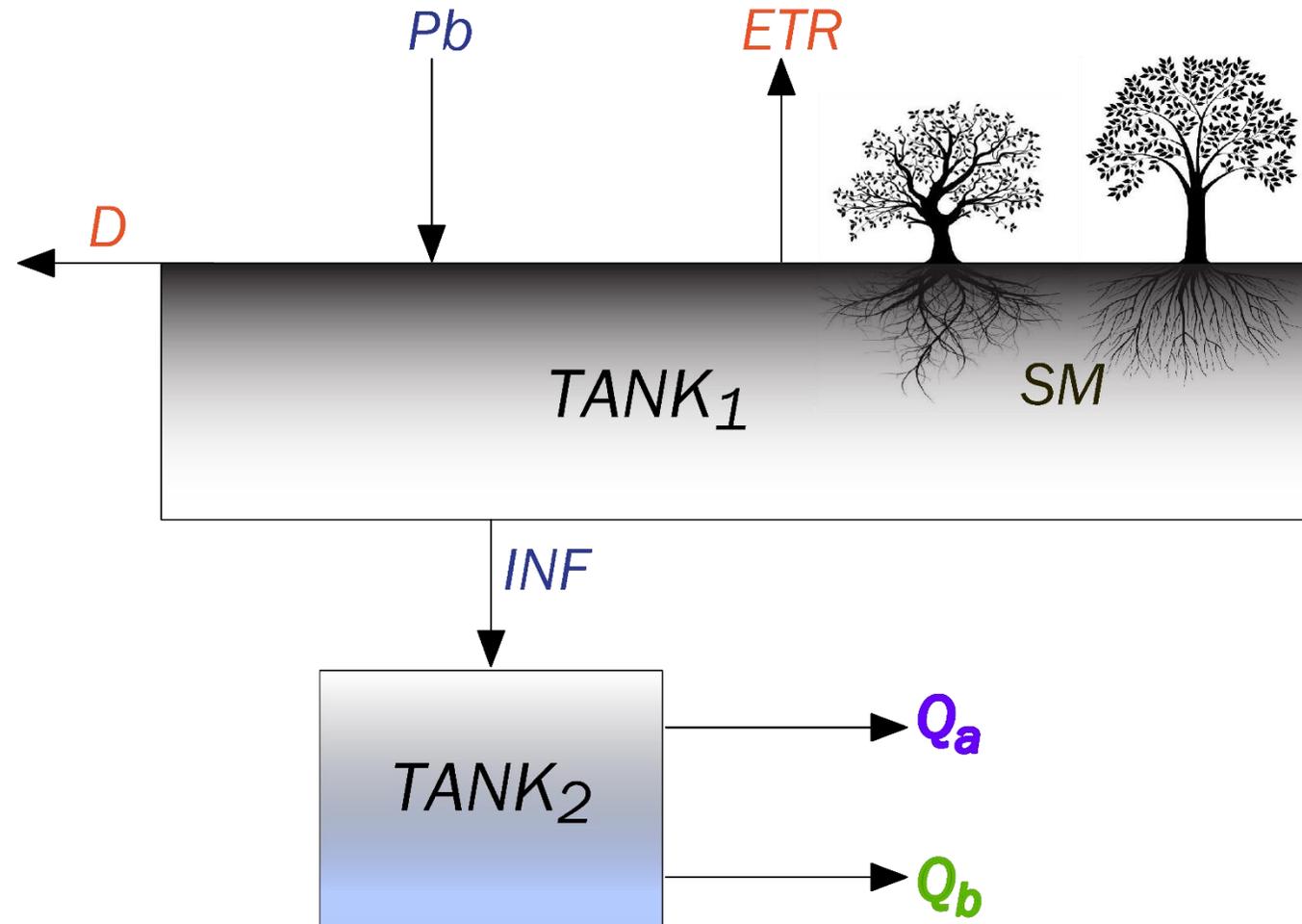


CReIAMO PA

Schema geologico dell'acquifero



Modelli di bilancio idrogeologico a scala mensile



Calibrazione: periodo gennaio 2002 - dicembre 2016

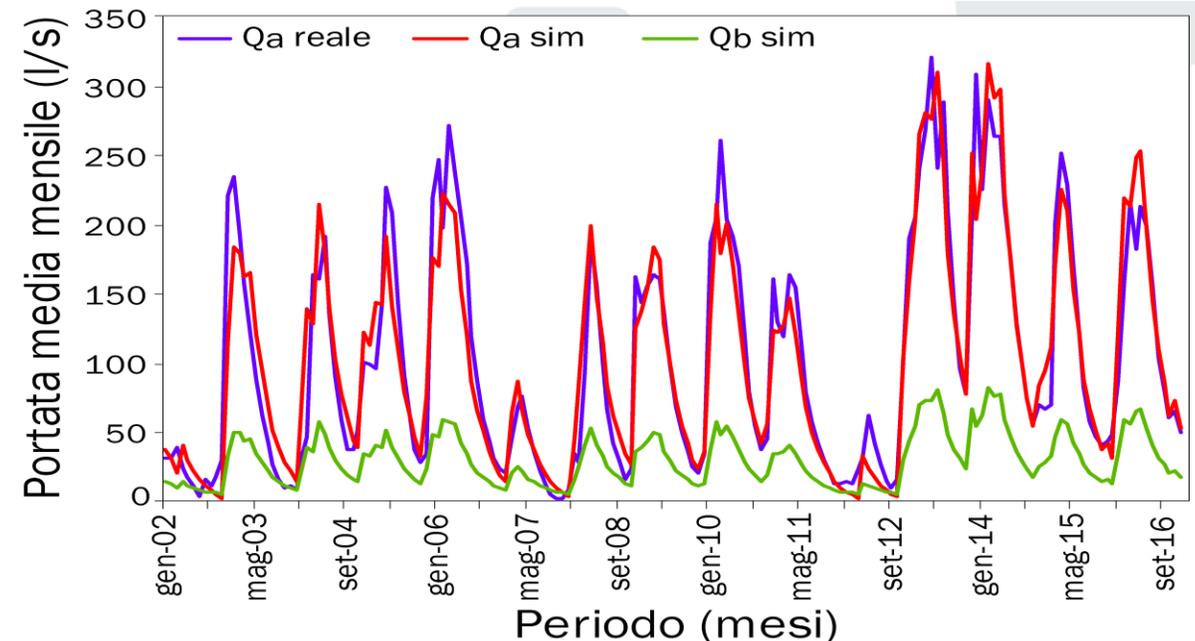
Sigla	P _b (mm)	T _m (°C)	Q _a (reale) (L/s)	Q _a (sim) (L/s)	Q _b (sim) (L/s)	Correlazione (%) Q _a (reale) - Q _a (sim)	R
Calibrazione (2002-2016)	1402	8.8	104	103	30	94	0.866

$$Err = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y'_i)^2}{N - n}}$$

Err=29%

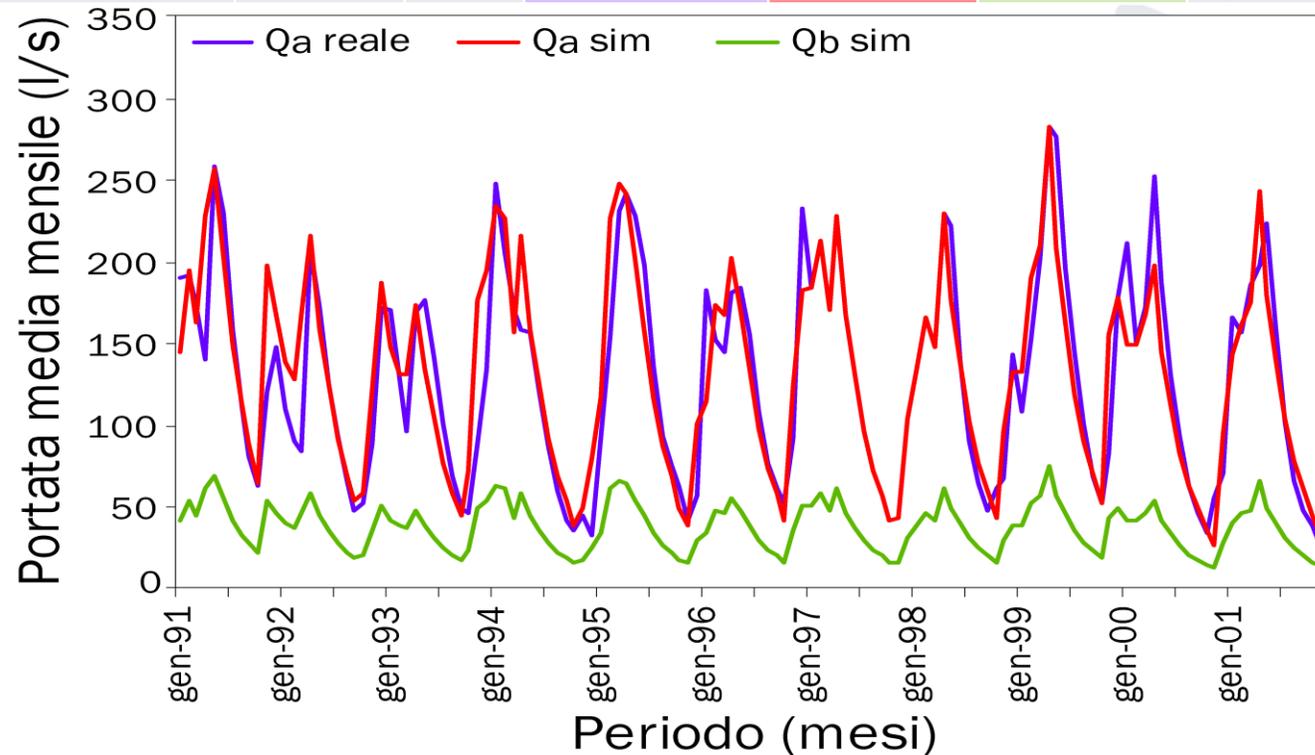
La minimizzazione dell'errore standard tra le portate reali della sorgente di Bagnara e le portate simulate della sorgente alta.

Camici S., Dragoni W., Melillo M., Valigi D., Bazzoffia A. (2018)



Validazione gennaio 1991- dicembre 2001

Sigla	P _b (mm)	T _m (°C)	Q _a (reale) (L/s)	Q _a (sim) (L/s)	Q _b (sim) (L/s)	Correlazione (%) Q _a (reale) - Q _a (sim)	R (adim.)
Validazione (1991-2001)	1499	8.5	126	129	37	88	0.751



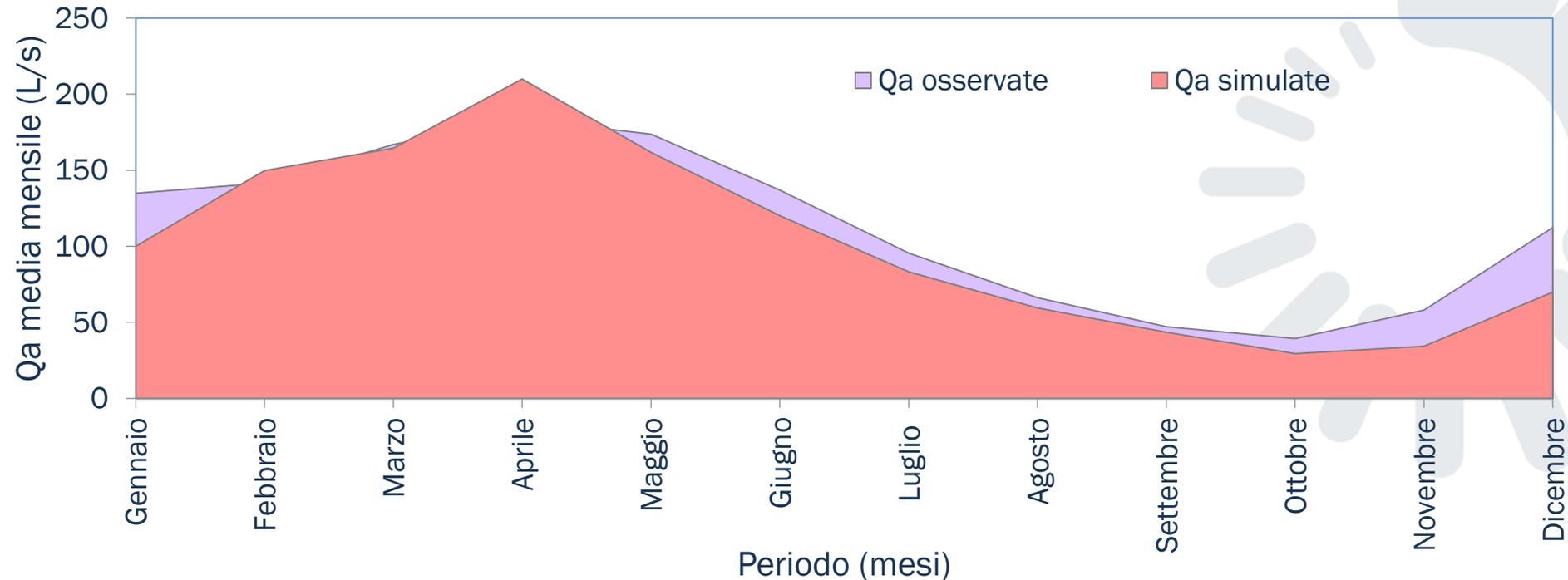
Err=29%

Camici S., Dragoni W., Melillo M., Valigi D., Bazzoffia A. (2018)



CREIAMO PA

Proiezione: gennaio 2021 – dicembre 2050 prolungamento dei trend termo - pluviometrici



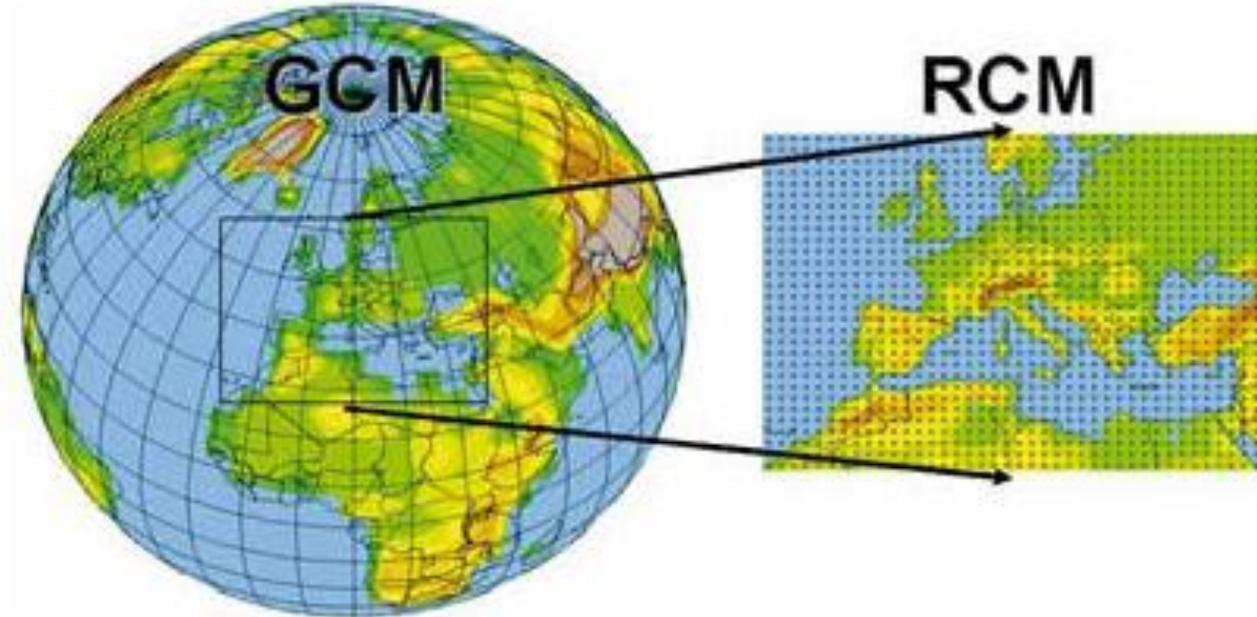
Sigla	Pb	Tm	Q _a	Q _b
	(mm)	(°C)	(l/s)	(l/s)
CALIBRAZIONE (1991-2016)	1443	8.7	112	31.72
PROIEZIONE (2021-2050)	1179	9.3	102	29.16
Δ	-18 %	0.6	-10 %	-8 %



CREIAMO PA

Camici S., Dragoni W., Melillo M., Valigi D., Bazzoffia A. (2018)

Modelli Climatici Regionali (RCMs)

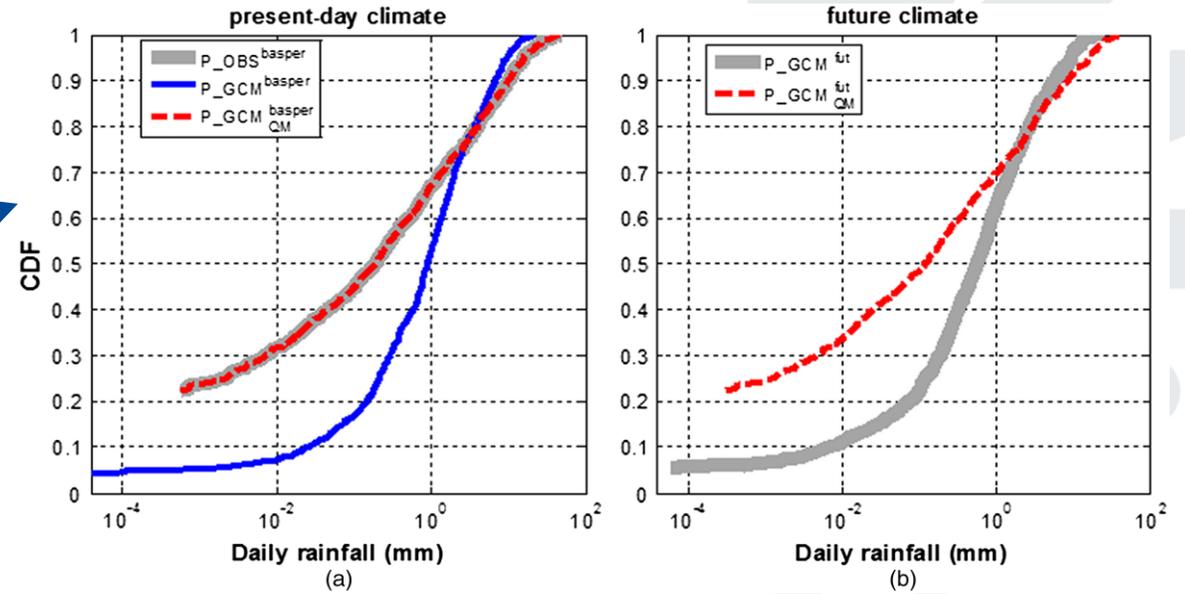
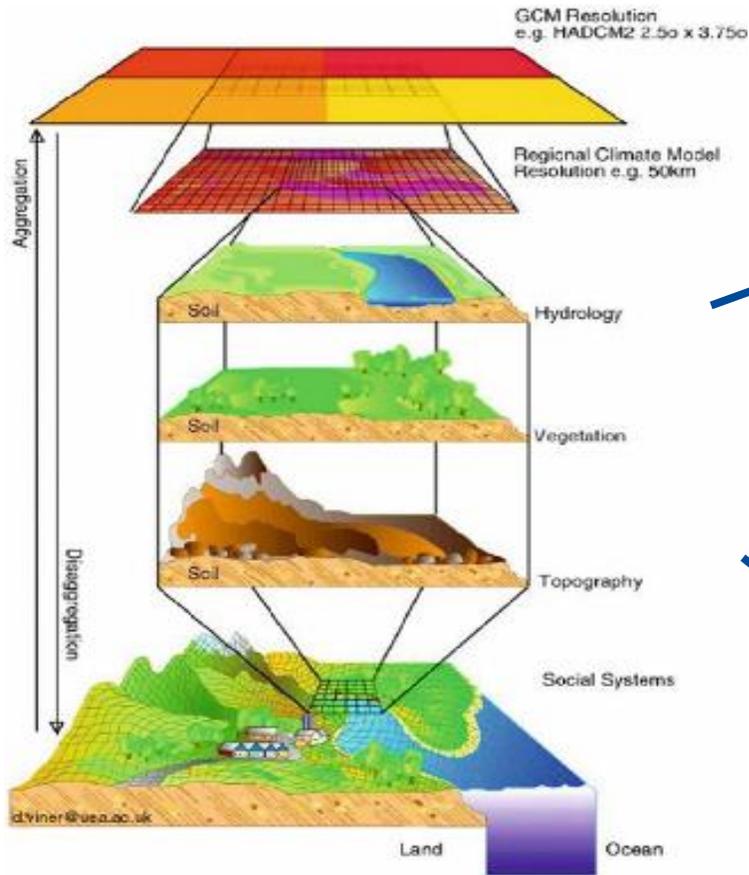


- Sono stati usati 12 Modelli Climatici Regionali (RCM), opportunamente *downscalati*, che hanno considerato valori di emissioni di gas serra di 4.5 W/m^2 (RCP4.5).

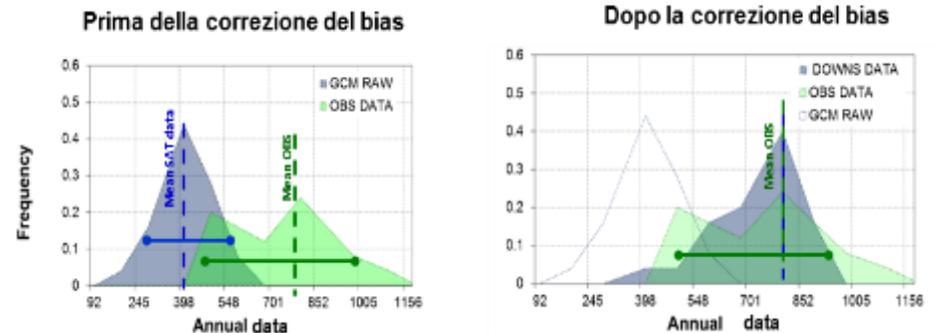


Downscaling statistico

Metodo dei quantili per le piogge



Rescaling lineare per le temperature



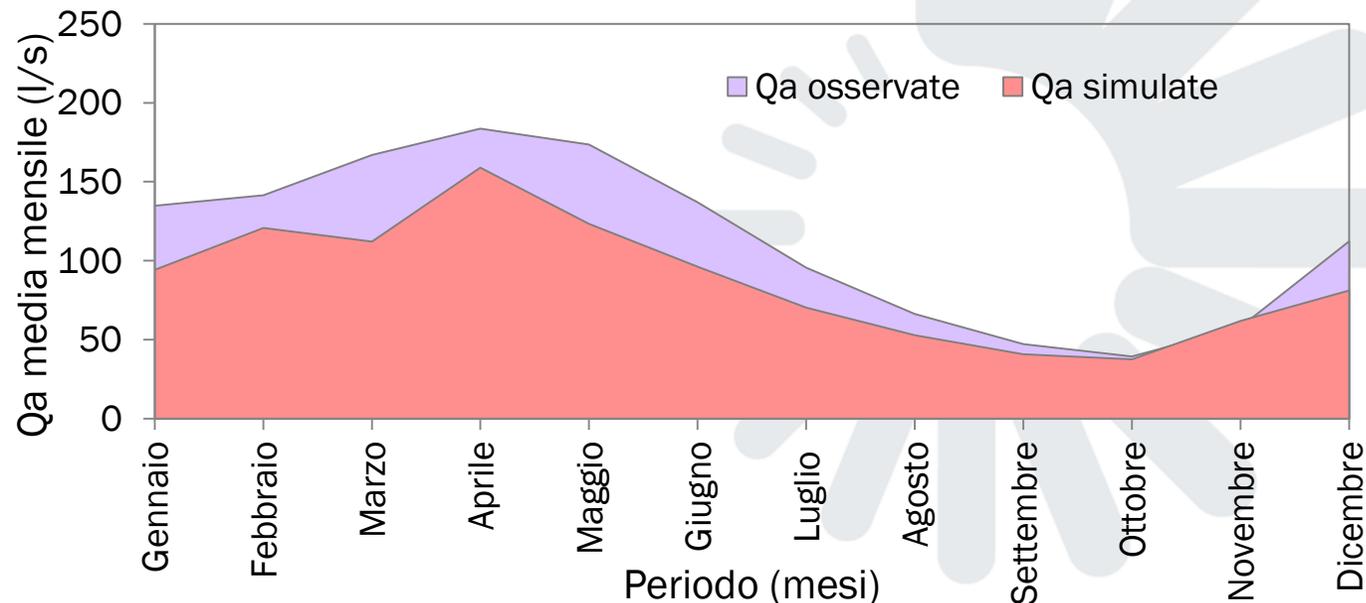
Proiezione gennaio 2021 – dicembre 2050

CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom-CCLM4-8-17 (RCP4.5)

Scenario più pessimistico:

Portate medie mensili

- osservate (1991-2016)
- simulate (2021-2050)



Sigla	Pb	Tm	Q _a	Q _b
	(mm)	(°C)	(L/s)	(L/s)
CALIBRAZIONE (1991-2016)	1443	8.7	113	31.7
PROIEZIONE (2021-2050)	1244	9.2	83	25.0
Δ	-14 %	0.5	-26 %	-21%

Camici S., Dragoni W., Melillo M., Valigi D., Bazzoffia A. (2018)



CReIAMO PA

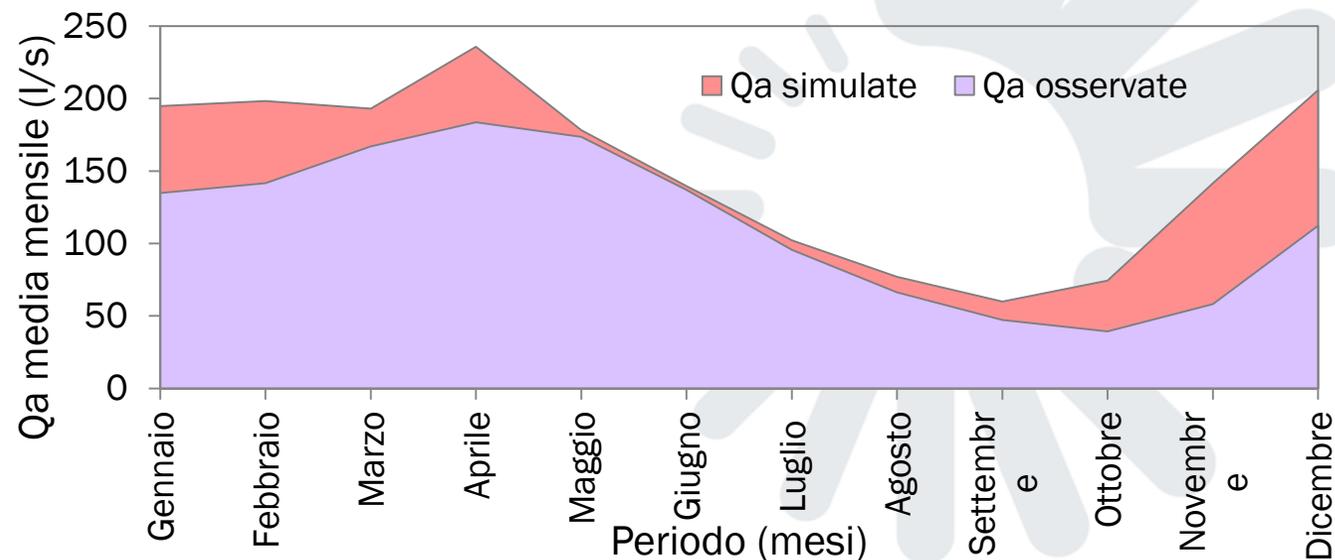
Proiezione gennaio 2021 – dicembre 2050

MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4 (RCP4.5)

Scenario più ottimistico:

Portate medie mensili

- osservate (1991-2016)
- simulate (2021-2050)



Sigla	Pb	Tm	Q _a	Q _b
	(mm)	(°C)	(L/s)	(L/s)
CALIBRAZIONE (1991-2016)	1443	8.7	113	31.7
PROIEZIONE (2021-2050)	1613	9.6	144	39.0
Δ	+12 %	0.5	+27 %	+23%

Camici S., Dragoni W., Melillo M., Valigi D., Bazzoffia A. (2018)



CReIAMO PA

Risultati proiezioni

- Portate della sorgente Bagnara, nel periodo 2021-2050, variano fra il -26% e + 27% rispetto a quelle del periodo 1991-2016.
- Le variazioni di flusso verso il circuito sotterraneo regionale, sono invece comprese fra -21% e + 23% rispetto a quelle del periodo 1991-2016.
- Portata va da un max di 144 L/s a un minimo di 83 L/s.



Analisi delle portate giornaliere durante le fasi di esaurimento della sorgente di Bagnara (senza ricarica)

Equazione di Maillet

$$Q_t = Q_0 * e^{-\alpha t}$$

Q_t = portata ad un tempo t

Q_0 = portata al tempo $t=0$

α = coefficiente di esaurimento in giorni^{-1}

t = tempo in giorni

α Maillet (giorni^{-1})

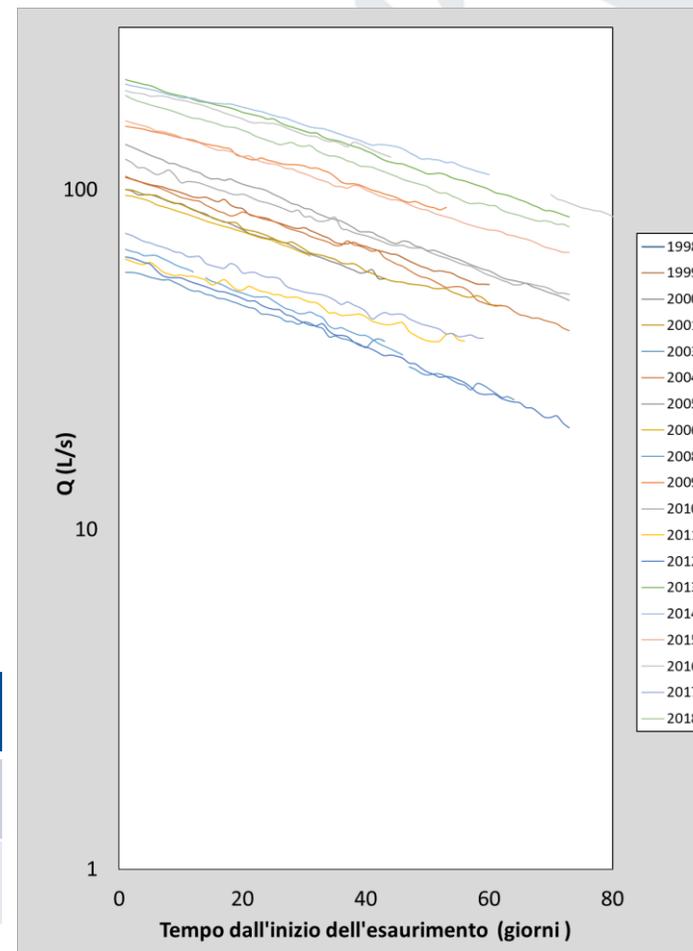
MIN

$1.1 * 10^{-2}$

MAX

$4.7 * 10^{-2}$

(Portate misurate dall'Arpa Umbria)

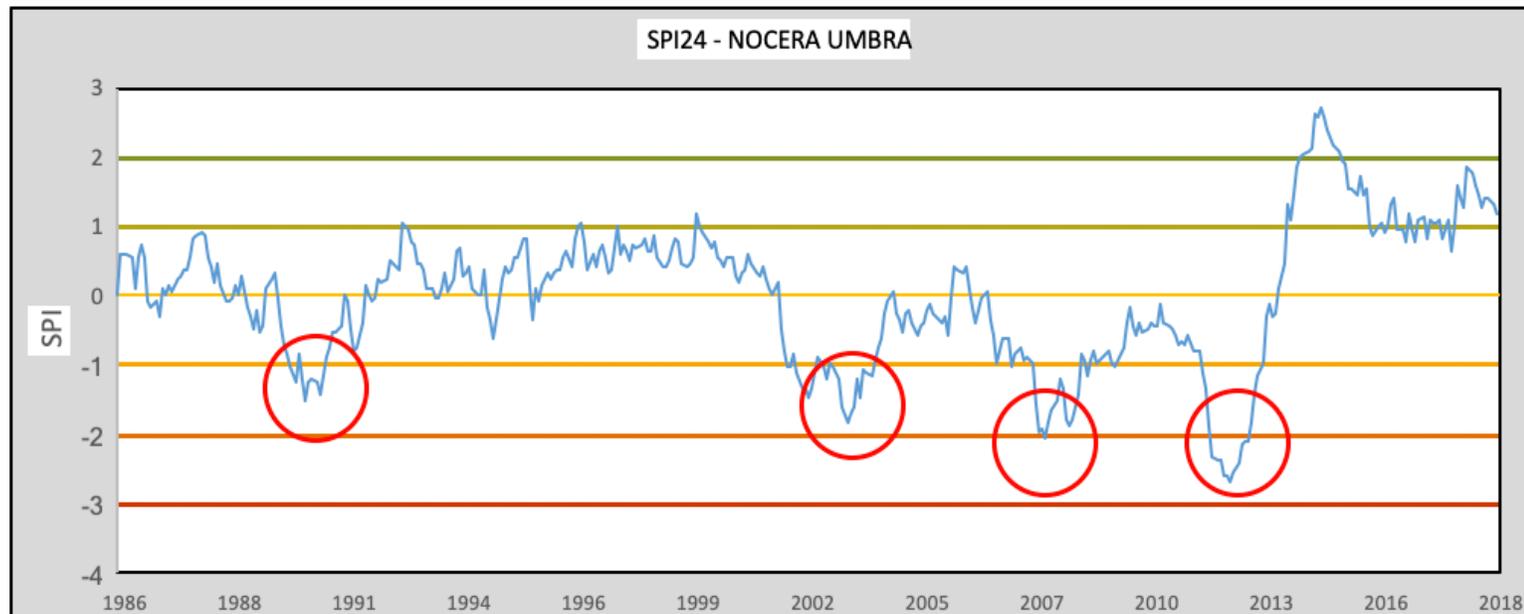


(Ippoliti, 2019)



CREIAMO PA

Standard Precipitation Index (SPI24)



Valori SPI	Legenda
SPI >2	Umidità estrema
>2 SPI > 1.5	Umidità severa
>1.5 SPI >1	Umidità moderata
>1 SPI > -1	Nella norma
>-1 SPI >-1.5	Siccità moderata
>-1.5 SPI >-2	Siccità severa
SPI <-2	Siccità estrema

$$SPI = \frac{P_i - P_m}{\sigma}$$

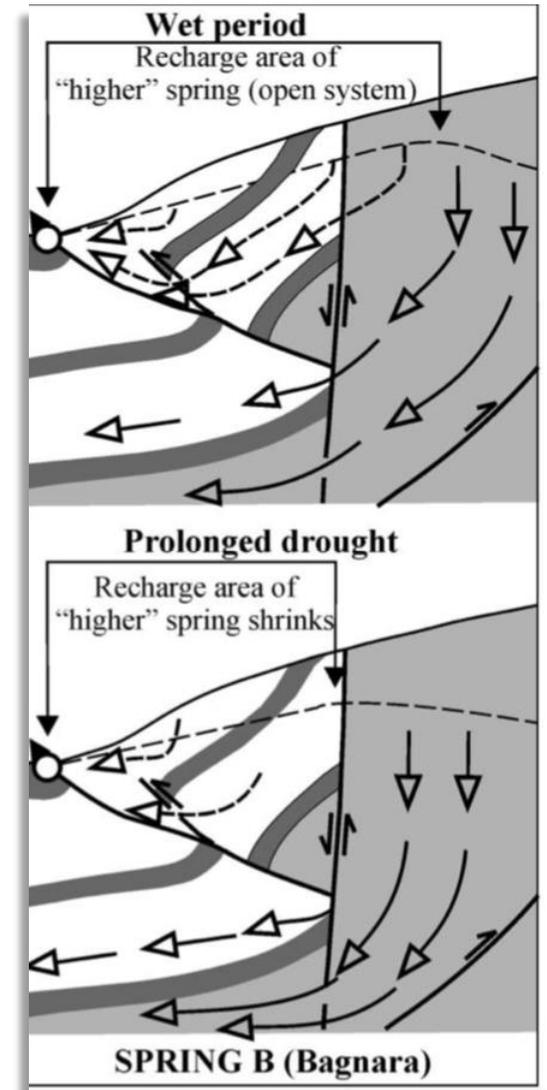
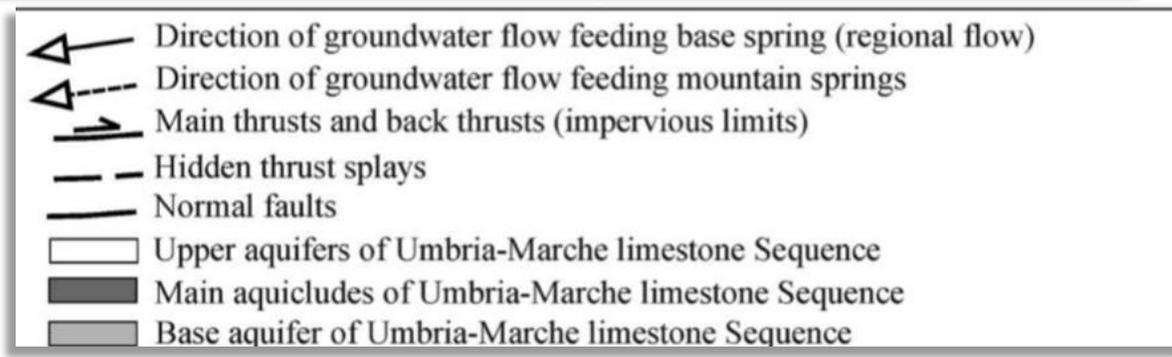
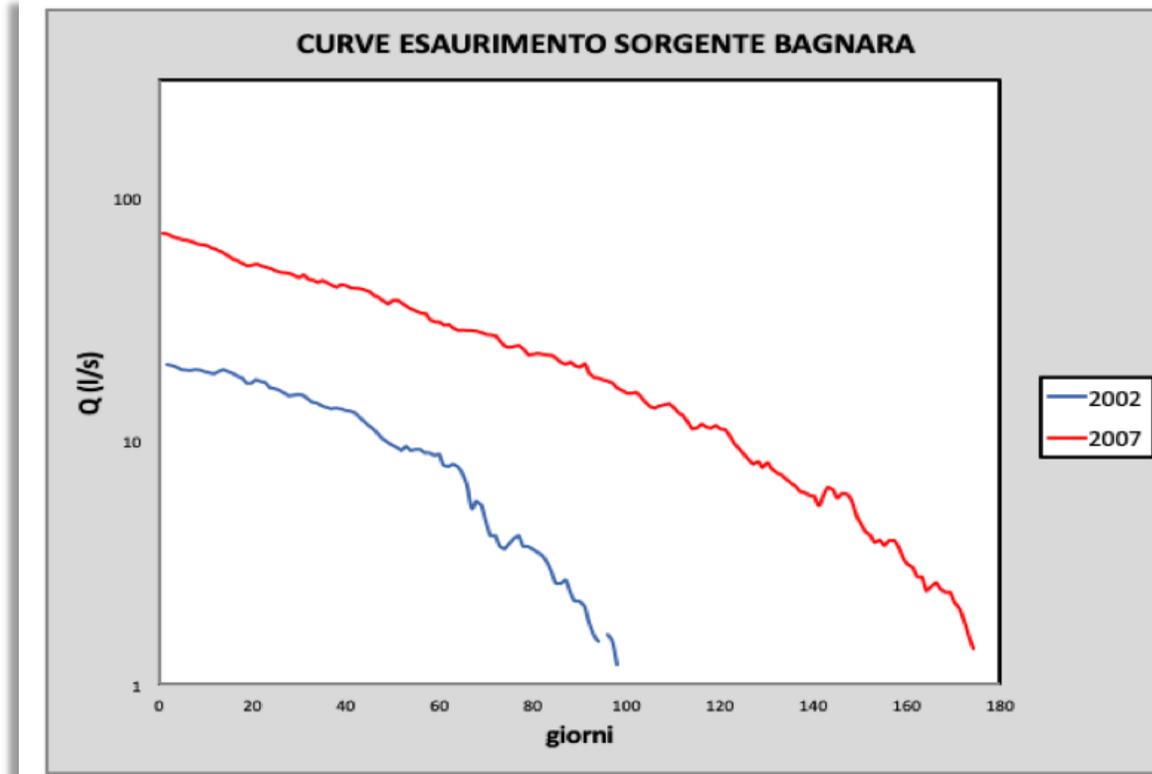
P_i = pioggia media della scala temporale;

P_m = pioggia media relativa all'intero periodo;

σ = deviazione standard dell'intero periodo.



In periodi di siccità severa od estrema (SPI < -1,5) la sorgente di Bagnara non segue più Maillet: l'acquifero si svuota più velocemente



Stralcio della carta dei bilanci idrogeologici e delle risorse idriche sotterranee di Boni et al., 1986.

Interconnessione tra diverse strutture idrogeologiche: Sorgente di Stifone



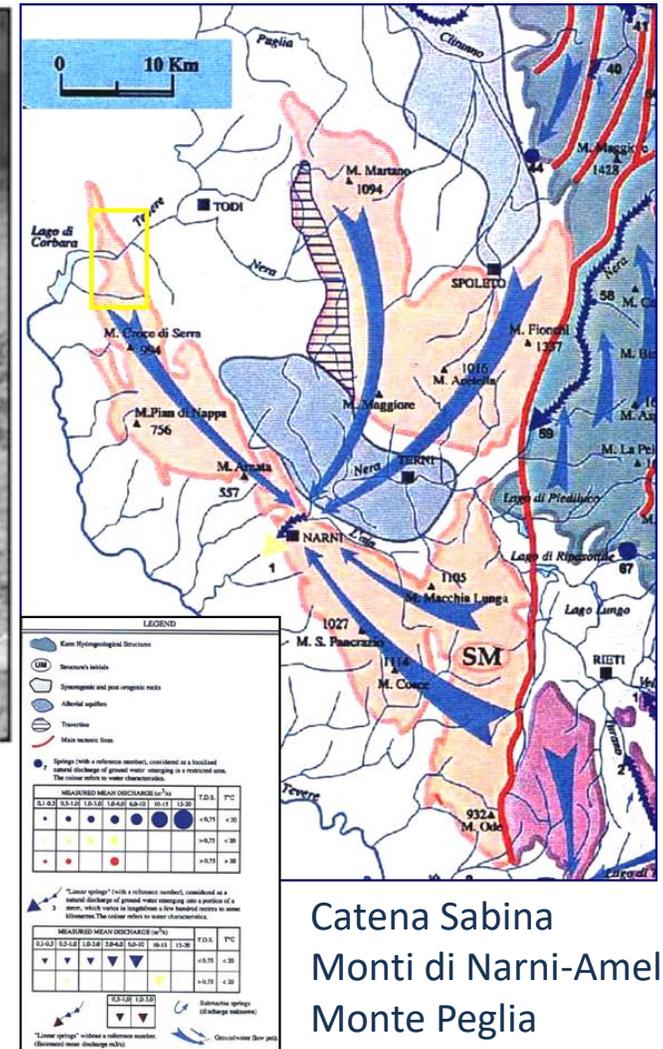
a) Sorgenti nei pressi di Stifone. b) Sorgenti lineari in sinistra idrografica tra le dighe di Recentino e La Morica. Foto effettuate da C. Cardellini durante i lavori di manutenzione degli invasi ripreso da *Di Matteo et al., 2009*.

Conducibilità sorgente Stifone/Nera Montoro = 3500-4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; $Q = 13.5 \text{ m}^3/\text{s}$.



CREIAMO PA

Boni et al., 1986; Boni et al., 2000; Di Matteo et al., 2009.



Catena Sabina
Monti di Narni-Amelia
Monte Peglia
Catena Martana

Grazie per l'attenzione

E-mail: daniela.valigi@unipg.it



Foto Francesco De Giorgi



CReIAMO PA