

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Modellazione a scala giornaliera del bilancio idrico della
Regione idrografica Piemonte – Valle D’Aosta



Relatori:

Prof. Pierluigi Claps

Prof.ssa Stefania Tamea

Candidato:

Giuseppe Giannetta

Anno Accademico 2018/19

Sommario

INTRODUZIONE.....	1
1 LA MODELLAZIONE IDROLOGICA	4
1.1 Il ciclo idrologico	4
1.2 I tipi di modelli idrologici	5
1.3 Il Modello SWAT	8
1.3.1 Caratteristiche generali	8
1.3.2 Configurazione del bacino in SWAT.....	9
1.3.3 Parametrizzazione del bilancio idrologico in SWAT	11
1.3.4 I dati climatici di input richiesti.....	13
1.3.5 Land Phase: Intercettazione della vegetazione	14
1.3.6 Land Phase: Infiltrazione	15
1.3.7 Land Phase: Redistribuzione.....	15
1.3.8 Land Phase: Evapotraspirazione	16
1.3.9 Land Phase: Deflusso laterale sub-superficiale	17
1.3.10 Land Phase: Deflusso superficiale	18
1.3.11 Routing Phase	25
2 IL CASO DI STUDIO	26
2.1 La regione idrografica Piemonte-Valle D'Aosta.....	26
2.2 I dati di input richiesti	28
2.2.1 Il modello digitale del terreno ed il reticolo idrografico.....	29
2.2.2 La carta di uso dei suoli CLC	30
2.2.3 L'ESDB e le proprietà del suolo derivate	33
2.2.4 I dati climatici ARPA Piemonte	36
2.3 Implementazione del modello SWAT.....	37
2.3.1 Delineazione del bacino idrografico	38
2.3.2 Definizione delle HRU	41
2.3.3 Processing dei dati climatici e del database di default.....	44
2.3.4 Simulazione.....	45
3 I RISULTATI DEL MODELLO SWAT	46
3.1 I report di ArcSWAT.....	46
3.1.1 Report topografico	46
3.1.2 HRU Analysis Report	47
3.1.3 Master watershed file.....	48

3.2	I deflussi nelle sezioni di confronto	49
3.2.1	Le funzioni obiettivo utilizzate	51
3.2.2	Risultati del modello predefinito	52
3.2.3	Il grigliato NWIOI	59
4	LA CALIBRAZIONE DEL MODELLO SWAT	61
4.1	SWATCUP.....	61
4.1.1	Protocollo di calibrazione	62
4.2	I risultati della calibrazione	63
4.2.1	Gli obiettivi della calibrazione.....	63
4.2.2	I parametri da calibrare	64
4.2.3	I risultati del modello calibrato	68
4.2.4	La validazione dei deflussi nelle sezioni di confronto.....	70
	CONCLUSIONI	74
	BIBLIOGRAFIA	77
	APPENDICE. Scatterplot dei deflussi nelle sezioni di confronto	80

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1-1.	Runoff curve numbers for cultivated agricultural lands ^{1/} (210-VI-TR-55, Second Ed., June 1986).	22
Tabella 1-2.	Runoff curve numbers for other agricultural lands ^{1/} (210-VI-TR-55, Second Ed., June 1986).....	23
Tabella 1-3.	Runoff curve numbers for urban areas ^{1/} (210-VI-TR-55, Second Ed., June 1986).	24
Tabella 2-1.	Caratteristiche del sito della sez. di chiusura e del bacino del Po ad Isola Sant'Antonio (Al).....	27
Tabella 2-2.	Classi di uso del suolo del Corine Land Cover e corrispondente in SWAT.	33
Tabella 2-3.	Proprietà del suolo richieste da SWAT	35
Tabella 3-1.	Caratteristiche delle stazioni di misura utilizzate per la validazione del modello.....	49
Tabella 3-2.	Statistiche di errore intervallo 2002/11.....	52
Tabella 3-3.	Statistiche di errore intervallo 2013/17.....	53
Tabella 3-4.	Portate medie osservate e simulate per i vari bacini.	57
Tabella 3-5.	Indice di correlazione delle precipitazioni e delle temperature, massime e minime.....	59
Tabella 3-6.	Indice di correlazione delle precipitazioni.....	60
Tabella 4-1.	Report dell'ultima iterazione di calibrazione.....	68
Tabella 4-2.	Valori assunti dalle funzioni obiettivo relativi al modello predefinito.	70
Tabella 4-3.	Valori assunti dalle funzioni obiettivo relativi al modello calibrato.	70

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1-1. Rappresentazione del ciclo idrologico (US Geological Survey, 2017).	4
Figura 1-2. Schema di un modello SWAT.....	9
Figura 1-3. HRU command loop (Neitsch et al., 2011).	12
Figura 2-1. Area di studio tratta da ArcSwat.....	26
Figura 2-2. Modello digitale di elevazione a 20m.	29
Figura 2-3. Diagramma di flusso dell'operazioni da compiere per creare un modello in ArcSWAT.	38
Figura 2-4. Delineazione Mask e Burn-in del reticolo idrografico.....	39
Figura 2-5. Rappresentazione della rete fluviale individuata da ArcSWAT e dei punti di Outlet.	40
Figura 2-6. Sottobacini individuati dalla procedura automatica di ArcSWAT.	41
Figura 2-7. Rappresentazione delle classi di uso del suolo.	42
Figura 2-8. Rappresentazione delle classi di suolo.	43
Figura 2-9. Punti del grigliato NWIOI assegnati ai vari sottobacini.	45
Figura 3-1. Distribuzione delle quote sul bacino idrografico modellato.	46
Figura 3-2. Inquadramento geografico delle stazioni di misura.	50
Figura 3-3. Caratteristiche topografiche dei bacini a monte delle stazioni di misura.....	50
Figura 3-4. Andamento del PBIAS in funzione dell'altezza media del bacino.	54
Figura 3-5. Andamento del NS in funzione dell'altezza media del bacino.	54
Figura 3-6. NS per il 2013/15 ed il 2016/17.	55
Figura 3-7 RSR per il 2013/15 ed il 2016/17.....	55
Figura 3-8. MRE per il 2013/15 ed il 2016/17.....	55
Figura 3-9. Indice di Nash-Sutcliffe per il periodo 2013/17.....	56
Figura 3-10. Scatterplot (2013/17) ed idrogrammi della sezione di misure del Po ad Isola Sant'Antonio.	58
Figura 3-11. Raffronto tra l'andamento delle precipitazioni [mm] della stazione pluviometrica di Torino via della Consolata e del grigliato NWIOI.....	59
Figura 3-12. Raffronto tra l'andamento delle precipitazioni [mm] della stazione pluviometrica di Farigliano e del grigliato NWIOI.	60
Figura 4-1. Schermata dei parametri di calibrazione in SWAT-CUP.	66
Figura 4-2. Analisi di sensibilità.	66
Figura 4-3. Dotty Plot GWQMN-PBIAS relativo alla 1° iterazione.	67
Figura 4-4. Dotty Plot GWQMN-PBIAS relativo all'ultima iterazione.	67
Figura 4-5. 95ppu Plot tratto da SWAT-CUP.	69
Figura 4-6. Indice NS relativo ad il modello calibrato ed quello predefinito. .	71
Figura 4-7. Valori dell'indice RSR pre/post calibrazione per le varie stazioni.	71
Figura 4-8. Portate medie ottenute a fine calibrazione e del modello predefinito in m ³ /s per il 2013/17.	72
Figura 4-9. Scatterplot relativo alla sezione POIS ed all'intervallo di validazione 13/17.	73
Figura 4-10. Idrogramma relativo alla sezione POIS del 2017.	73

INTRODUZIONE

La disponibilità e l'utilizzo della risorsa idrica è uno dei temi maggiormente discussi e sentiti degli ultimi anni.

Preservare la risorsa idrica disponibile sul pianeta e renderla fruibile a tutti, anche alle future generazioni, è un principio imprescindibile. Il fabbisogno d'acqua, infatti, interessa svariate attività antropiche che incidono sul sistema idrico sia da un punto di vista quantitativo, per i volumi prelevati, che qualitativo. Si va dall'utilizzo in campo agricolo, che assorbe più della metà della domanda ed in un futuro dove il fabbisogno alimentare aumenta e le terre coltivabili diminuiscono sarà sempre più fondamentale, a quello nel campo domestico, industriale oppure energetico. Le acque sono spesso restituite ai corsi idrici degradate da rifiuti e sostanze inquinanti. Tutto ciò, unito a tutte le problematiche sul tema indotte dai cambiamenti climatici, mostra come sia fondamentale una gestione consapevole della risorsa idrica, con strategie per ottimizzare i prelievi, gli usi, gli sprechi e per garantire al tempo stesso il mantenimento di standard di qualità.

Il primo passo da fare in questa direzione è la realizzazione di strumenti che consentano di conoscere e valutare i deflussi di fiumi e torrenti, da sempre le principali fonti di approvvigionamento d'acqua. A questa esigenza rispondono i modelli idrologici che, essendo capaci di simulare qualsiasi scenario, passato come futuro, diventano un primo ed importante aiuto nella gestione della risorsa idrica.

Prendendo spunto da queste considerazioni si è pensato di realizzare uno studio finalizzato alla costruzione di un modello di bilancio idrologico a scala regionale del Piemonte, valutandone poi la correttezza confrontando i deflussi giornalieri calcolati con quelli misurati nella sezione di chiusura del bacino, in corrispondenza della stazione idrometrica di Isola Sant'Antonio (AL), sul fiume Po, ed in altre stazioni intermedie.

Per fare ciò si è utilizzato il modello SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1993), un modello idrologico complesso che opera a scala di bacino, usato per simulare la quantità e qualità delle acque superficiali e

sotterranee e prevedere l'impatto ambientale dell'uso del suolo, delle pratiche di gestione del territorio e dei cambiamenti climatici. SWAT è inoltre largamente usato anche per anticipare e controllare l'erosione del suolo, l'inquinamento da fonti non puntiformi e la gestione regionale dei bacini idrografici.

Tra i tanti modelli disponibili, la scelta è ricaduta su SWAT perché è un modello open source ed è dotato di un'interfaccia GIS, ArcSWAT, che lo rende di facile fruibilità. Inoltre, è impiegato con successo in tutto il mondo con un numero ampio e crescente di applicazioni in vari studi, da una vasta rete di utilizzatori e sviluppatori. Sebbene SWAT sia stato sviluppato in principio per quantificare l'impatto delle pratiche di gestione del territorio in bacini di grandi dimensioni e per lo più pianeggianti, il suo utilizzo è possibile per ogni tipo di bacino e si è voluta verificare la sua adattabilità a bacini come quelli Piemontesi.

SWAT consente di calcolare le diverse componenti del bilancio idrico quali, per esempio, i deflussi giornalieri. Per poter implementare il modello idrologico di SWAT è necessario fornire specifiche informazioni su topografia del territorio, suolo, uso del suolo ed i dati climatici. Questo aspetto può rappresentare un problema, soprattutto nel caso di applicazioni a larga scala, perché si traduce nella necessità di reperire database climatici e di uso e caratteristiche del suolo che abbiano adeguata copertura ed esattezza tale da rendere i risultati accettabili. I parametri che regolano la modellazione sono tanti e coprono svariati processi del ciclo idrologico ma SWAT fornisce dei dati di default che consentono comunque di ottenere una buona simulazione, migliorabile andando ad inserire dei dati più accurati, tarati sul bacino di studio.

La modellazione dei bacini idrografici può risultare molto difficile perché ci sono tante variabili in gioco, fortemente interconnesse. I fattori da prendere in considerazione sono molteplici: la morfologia del territorio, le caratteristiche dei suoli ed i loro usi, i dati climatici quali precipitazioni, temperature, velocità del vento, radiazione solare e la loro distribuzione spaziale. Tutte queste variabili, una volta definiti i processi di simulazione dei fenomeni che avvengono, influenzano la caratterizzazione dei flussi d'acqua, oltre che dei carichi ad essi annessi quali inquinanti o sedimenti.

La trattazione è articolata in quattro capitoli: nel primo si illustrano brevemente

i vari tipi di modello idrologico per poi concentrarsi, in maniera più approfondita, nella descrizione di SWAT e del processo simulativo del ciclo idrologico in esso implementato. Nel secondo capitolo, invece, viene illustrato il caso studio, descrivendo in maniera puntuale i vari passi compiuti, dall'individuazione degli input richiesti sino all'implementazione del modello e delle varie fasi della simulazione. Nel terzo capitolo vengono esposti i risultati del modello originale, i vari report forniti dal programma ed il raffronto tra le portate medie giornaliere calcolate e quelle misurate nella varie sezioni di confronto. Infine, nell'ultimo capitolo viene affrontata la calibrazione del modello, eseguita con l'ausilio del software STAT-CUP (Calibration and Uncertainty Procedures, Abbaspour et al., 2007), un programma standalone sviluppato per la calibrazione di SWAT.

1 LA MODELLAZIONE IDROLOGICA

1.1 Il ciclo idrologico

Il ciclo idrologico rappresenta il sistema con il quale l'acqua presente in natura circola nell'idrosfera e si trasforma. Come si può vedere in figura 1, trattandosi di un ciclo, non vi è né un inizio né una fine.



Figura 1-1. Rappresentazione del ciclo idrologico (US Geological Survey, 2017).

L'acqua del mare e le acque dolci, riscaldate dal Sole, evaporano e diventano parte dell'atmosfera sotto forma di vapore acqueo; tra le acque evaporate vi è anche una parte dovuta alla traspirazione delle piante e questo fenomeno è detto evapotraspirazione.

Il vapore è trattenuto nell'atmosfera sino a che l'abbassarsi delle temperature non ne provoca la condensazione; si formano così le nuvole. Quest'ultime, trasportate dai venti, collidono e danno luogo alle precipitazioni con le quali l'acqua ritorna sulla terra.

L'acqua, una volta precipitata, può venire intercettata dalle piante o traspirata, può defluire in superficie per ruscellamento sino ad incanalarsi nei corpi idrici superficiali oppure può infiltrarsi nel terreno, andando ad alimentare gli acquiferi o i flussi d'acqua sotterranei per poi filtrare nuovamente in superficie

o emergere come sorgente. L'acqua incanalata nei corpi idrici superficiali va ad alimentare i fiumi e si muove nuovamente verso il mare oppure si accumula come acqua dolce nei laghi. Il ciclo così termina per poi cominciare nuovamente e dare luogo a questi complessi fenomeni di condensazione, precipitazione, evaporazione, intercettamento, traspirazione, infiltrazione, incanalamento e scorrimento.

1.2 I tipi di modelli idrologici

I modelli idrologici afflussi-deflussi sono annoverati tra la categoria dei modelli integrati poiché operare sui processi che, a partire dalle precipitazioni, portano alla formazione del deflusso, significa modellare tante variabili e la quasi totalità del ciclo dell'acqua precedentemente illustrato per lunghe serie temporali; al contrario i modelli che si pongono l'obiettivo di analizzare un aspetto particolare del ciclo idrologico o un singolo evento temporale sono detti modelli di singolo processo.

La prima classificazione che si può fare quindi per distinguere i vari tipi di modello è in base alle scale spaziali e temporali. Vi sono, infatti:

- I *modelli completi*, i quali si propongono di simulare una porzione estesa del ciclo idrologico e dei processi in atto all'interno del bacino per lunghi intervalli temporali, continui e prolungati;
- I *modelli di piena*, implementati allo scopo di simulare degli eventi eccezionali di ridotta estensione temporale ed incentrati soltanto sui processi del ciclo idrologico di interesse all'obiettivo prefissato.

Un'altra grande distinzione è tra i modelli di *tipo deterministico* e quelli di *tipo stocastico*. Nei primi, che ignorano le variazioni casuali, partendo da dei dati valori di input ed applicando il modello, si ottiene sempre lo stesso ed unico set di output di risposta. I secondi, invece, sono basati su calcoli di probabilità; i dati in ingresso sono grandezze aleatorie e di conseguenza, fornendo un dato set di dati di input, il modello restituisce output diversi, espressi in termini di variazioni probabilistiche.

In funzione del modo in cui le equazioni costitutive dei processi fisici che si

desidera rappresentare vengono organizzate ed impostate nel modello, si può distinguere tra:

- *Modelli fisicamente basati*: modelli in cui le equazioni relative all'equilibrio dinamico e al bilancio di massa caratterizzanti i processi idraulici e idrologici sono risolte senza essere semplificate o approssimate.
- *Modelli concettuali*: eseguono un'ulteriore semplificazione del processo fisico, idraulico e idrologico che si desidera rappresentare. Tale semplificazione viene ottenuta in base alla natura e alla dinamica del caso che si vuole riprodurre. Un caso esplicativo di modello concettuale è la schematizzazione dei diversi tipi di immagazzinamento dei flussi in un bacino con dei serbatoi collegati all'interno.
- *Modelli empirici*: essi mettono in relazione le variabili di ingresso con quelle di uscita attraverso funzioni indipendenti dalla rappresentazione o schematizzazione dei processi idraulici o idrologici.

I modelli concettuali rappresentano una via di mezzo tra i due estremi, modelli fisicamente basati ed empirici. I parametri relativi al modello concettuale si distinguono in vari tipi e caratterizzano il modello a livello spaziale. E' possibile distinguere, infatti, tra:

- *Modelli a parametri concentrati*. Questo tipo di metodologia porta a definire il bacino idrografico come un'unica entità, oppure a prendere in considerazione una scala spaziale ampia, avente uguali proprietà in ogni punto, quindi priva di variabilità spaziale.
- *Modelli a parametri distribuiti*: essi sono tutti i modelli caratterizzati da parametri aventi una dipendenza spaziale quindi la variabilità da punto a punto e nel tempo viene riprodotta tramite una divisione del bacino in raster, ovvero celle quadrate caratterizzate da un livello di dettaglio buono.

Questo secondo tipo di modello è quello più simile alla rappresentazione dello stato fisico del bacino, infatti presenta proprietà funzioni dello spazio, diverse

da punto a punto. Tuttavia una distribuzione di tipo spaziale risulta difficile da esprimere così come le proprietà fisiche e di utilizzo del bacino. Per queste motivazioni si utilizzano i parametri concentrati, che vengono assunti costanti sull'intero bacino. Una classe di modelli che sintetizza i due tipi di modello appena descritti si rende necessaria ed è quella dei modelli a *parametri semidistribuiti*: per questi modelli il bacino può essere considerato come un insieme di sotto-porzioni all'interno di ognuna delle quali si considera un'elaborazione di tipo concettuale.

In letteratura sono presenti diversi tipi di modelli e resta complesso definire quale di essi risulti più adatto alla rappresentazione di un sistema idrologico. Infatti l'utilizzo di modelli fisicamente basati fornisce risultati dettagliati in piccola scala e per questo i modelli di questo tipo vengono usati per la descrizione di meccanismi di trasporto solido. I modelli fisicamente basati, però, sono molto difficili da utilizzare a causa dei meccanismi di preprocessamento e gli elevati costi computazionali, nonostante le migliorie dei sistemi software per il calcolo, ed inoltre presentano un numero elevato di dati in ingresso e questo rappresenta un'ulteriore aspetto negativo. Questi aspetti fanno sì che i modelli fisicamente basati siano più complicati da utilizzare nelle applicazioni a scala di bacino rispetto ad i modelli concettuali, che richiedono un numero minore di dati di input, anche qualitativamente peggiori, e risultano più facili da impostare e più veloci.

Una buona sintesi tra i due tipi di modello risultano essere i modelli a parametri semidistribuiti, i quali permettono di conservare una certa variabilità spaziale grazie al fatto di dividere il bacino in vari sottosistemi sui quali si opera in maniera concettuale, attribuendo dei valori unici ad i dati in ingresso. Tuttavia in questi casi è necessario calibrare questi parametri. La calibrazione consiste nello scegliere dei valori dei parametri in ingresso che siano capaci di massimizzare l'aderenza tra ciò che è simulato e la realtà, nel caso dei modelli afflussi-deflussi quindi tra le portate calcolate e quelle misurate in corrispondenza della sezione di chiusura del bacino. Conseguenza di tutto ciò è che questo tipo di modelli richiede la conoscenza delle serie storiche di portata osservate.

1.3 Il Modello SWAT

1.3.1 Caratteristiche generali

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) è un modello open source, sviluppato agli inizi degli anni 90 dall' US Department of Agriculture-Agricultural Research Service (USDAARS) e dalla Texas A&M University AgriLife Blackland Research CenterSWAT.

Permette di simulare il ciclo idrologico in bacini anche molto complessi, di stimare le sue varie componenti ed è un valido strumento per predire gli effetti delle pratiche di gestione del territorio sui corpi idrici in termini di portate, trasporto di sedimenti, di nutrienti e pesticidi. Nel presente lavoro, nonostante SWAT sia in grado di modellare molti processi fisici, ci si è focalizzati soltanto sul bilancio idrologico, trascurando gli altri processi collegati come per esempio il trasporto dei sedimenti o dei nutrienti.

SWAT è un modello fisicamente basato che richiede specifiche informazioni su topografia del territorio, suolo, uso del suolo, clima e pratiche gestionali. Tutti i processi fisici sono direttamente modellati da SWAT, usando questi dati di input. Tutto ciò è un vantaggio soprattutto per quei bacini in cui non si hanno misure dirette che così possono ugualmente venir modellati oppure nel caso in cui si vogliono determinare gli impatti di dati di input alternativi che possono essere indotti, per esempio, dai cambiamenti climatici.

SWAT lavora su lunghi archi temporali, non risultando così adatto alla simulazione di singoli dettagliati eventi. La simulazione è di tipo continuo: i dati di input possono essere a scala giornaliera o sub-giornaliera; gli output restituiti, invece, sono a scala giornaliera, mensile o annua.

In SWAT il bacino è diviso in più sottobacini che sono a loro volta divisi in più unità di risposta idrologica (HRU) che consistono in porzioni di territorio caratterizzate da tipo di suolo, uso del suolo e caratteristiche topografiche (pendenza media) omogenee. La suddivisione in sottobacini è molto utile, soprattutto quando si simulano bacini molto complessi ed eterogenei, e permette all'utente di riferirsi ad aree specifiche del bacino; più la suddivisione è dettagliata e maggiori saranno i tempi computazionali.

La simulazione idrologica di un bacino si divide in due fasi, la prima è la Land

Phase del ciclo idrologico che determina l'ammontare di acqua che raggiunge il canale principale di ciascun sottobacino; la seconda è la Routing Phase che simula il movimento dell'acqua all'interno della rete idrografica del bacino, fino alla sezione di chiusura.

La simulazione del ciclo idrologico è funzione delle variabili climatiche di input che sono precipitazione giornaliera, temperature massime e minime, radiazione solare, velocità del vento ed umidità relativa. La neve è calcolata quando le temperature sono al di sotto dello zero. I processi idrologici simulati da SWAT includono l'intercettazione della chioma, l'evapotraspirazione, il deflusso superficiale, l'infiltrazione ed, all'interno del suolo, deflusso laterale, flusso di ritorno dalle falde acquifere superficiali e ricarica delle stesse, redistribuzione dell'umidità nel profilo del suolo, risalita capillare dalla falda acquifera superficiale alla zona radicale ed infine ricarica della falda acquifera profonda, che esclude l'acqua dal sistema. (K.C.Abbaspoura, E.Rouholahnejada, S.Vaghefia, R.Srinivasanb, H.Yangac, B.Kløved, 2015).

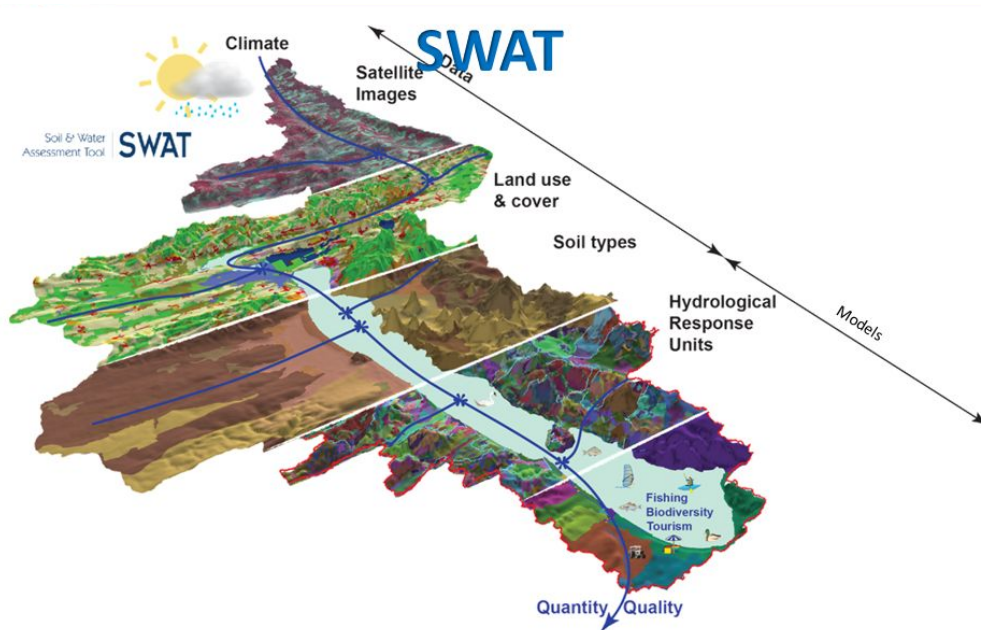


Figura 1-2. Schema di un modello SWAT.

1.3.2 Configurazione del bacino in SWAT

Il primo passo da fare quando si lavora con SWAT è la divisione del bacino in varie sotto unità. SWAT, infatti, permette di dividere il bacino in sottobacini ed i vari sottobacini in un numero illimitato di HRU (unità di risposta idrologica).

Ad ogni sottobacino è inoltre assegnato un segmento di canale principale ed un canale tributario. In maniera opzionale, è possibile anche individuare all'interno del bacino dei "Point sources" oppure dei "Reservoir".

Il primo livello di divisione è quello in sottobacini. La discretizzazione del bacino è fatta individuando i confini dei vari spartiacque che sono definiti dalla superficie topografica in modo tale che tutti i percorsi di flusso all'interno di un sottobacino fluiscano nel proprio canale principale e da qui verso la sezione di chiusura.

Ciascun sottobacino può successivamente essere diviso in una o più HRU. Le unità di risposta idrologica sono delle porzioni del sottobacino caratterizzate da tipo di suolo, uso del suolo e caratteristiche topografiche (pendenza media) omogenee. Questa suddivisione permette al modello SWAT di aumentarne la precisione e l'accuratezza in quanto permette di cogliere le differenze in termini di evapotraspirazione dovute ad i differenti tipi di suolo ed uso del suolo. Non c'è alcuna interazione tra le varie HRU all'interno di un sottobacino, il runoff è valutato separatamente per ciascuna HRU e successivamente viene sommato per ottenere il deflusso del sottobacino nel suo insieme.

A ciascun sottobacino è associato un canale principale nel quale vengono incanalati tutti i carichi provenienti dal sottobacino così come i deflussi provenienti dai corpi idrici principali dei sottobacini superiori interconnessi. Il canale tributario, invece, rappresenta il percorso di flusso più lungo all'interno di un sottobacino.

Con il termine "reservoir" si indicano non solo gli invasi artificiali ma anche i laghi naturali, ossia tutti gli invasi localizzati all'interno della rete fluviale che ricevono acqua dalla rete dei sottobacini superiori. Gli invasi isolati, che al contrario non possono ricevere acqua dagli altri sottobacini, sono denominati "pond".

SWAT, infine, permette di localizzare all'interno dei sottobacini dei "point sources", ossia dei punti in cui vi sono delle immissioni puntuali, di acqua, sedimenti o nutrienti, all'interno del bacino per le quali il modello permette di inserire i dati dei flussi giornalieri medi immessi all'interno della rete fluviale principale.

1.3.3 Parametrizzazione del bilancio idrologico in SWAT

Qualunque sia il problema affrontato su SWAT, il bilancio idrico è alla base di tutto ciò che accade nel bacino. La simulazione del ciclo idrologico in SWAT si basa sull'equazione del bilancio idrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

Dove:

- SW_t [mm] rappresenta il contenuto finale di acqua nel suolo al giorno t ;
- SW_0 [mm] è il contenuto iniziale di acqua nel suolo;
- R_{day} [mm] è il totale di precipitazione nel giorno i -esimo;
- Q_{surf} [mm] rappresenta l'ammontare del ruscellamento nel giorno i -esimo;
- E_a [mm] è il termine di evapotraspirazione nel giorno i -esimo;
- w_{seep} [mm] è l'acqua entrata all'interno della zona vadosa nel giorno i -esimo;
- Q_{gw} [mm] è il totale del flusso di ritorno nel giorno i -esimo.

All'interno della simulazione è possibile individuare due fasi, nella prima rientrano tutti i processi che determinano il trasferimento della risorsa idrica dalla superficie del sottobacino al network di drenaggio quali intercettazione della vegetazione, redistribuzione, evapotraspirazione, deflusso laterale e superficiale. La seconda fase è invece la Routing Phase che simula il movimento dell'acqua all'interno della rete idrografica del bacino, fino alla sezione di chiusura.

Nei paragrafi successivi verranno illustrati in maniera più approfondita tutti questi fenomeni.

Il deflusso è valutato separatamente per ogni HRU e successivamente tutti questi deflussi vengono sommati per determinare quello del bacino, lo schema di funzionamento del modello è mostrato nell'immagine successiva.

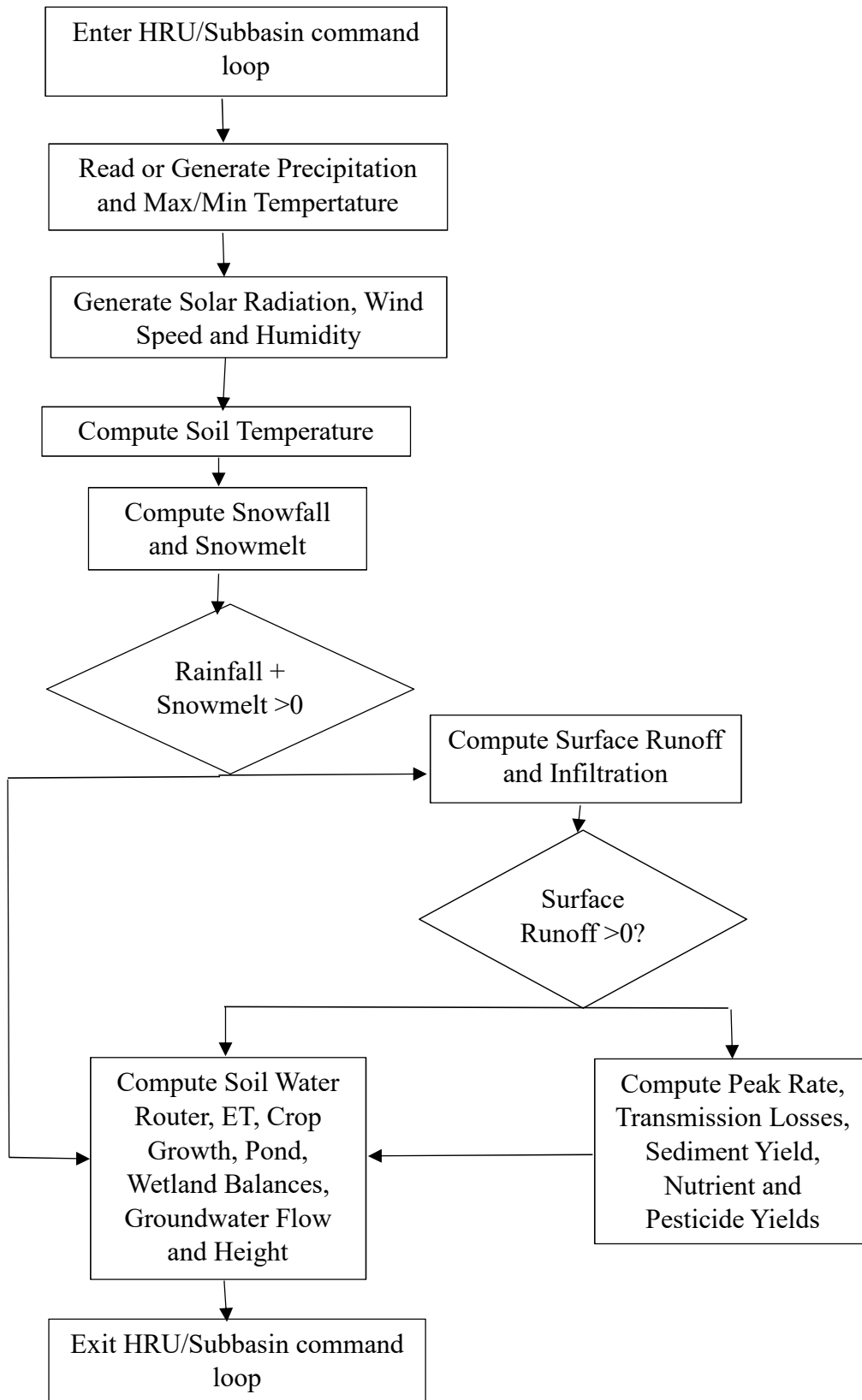


Figura 1-3. HRU command loop (Neitsch et al., 2011).

1.3.4 I dati climatici di input richiesti

Il ciclo dell'acqua ed i vari processi in esso contenuto sono funzione delle condizioni climatiche. SWAT perciò richiede una serie di input climatici che possono essere acquisiti dai dati a scala giornaliera o sub-giornaliera osservati dalle stazioni di misura sul territorio oppure possono essere generati tramite il Weather Generator di SWAT, basato sul modello generatore di dati climatici WXGEN (Sharpley e Williams, 1990), che fornisce i dati giornalieri a partire da quelli medi mensili calcolati su delle lunghe serie storiche. Tramite il Weather Generator è possibile sia simulare degli archi temporali mancanti nella serie storica di dati giornalieri osservati che simulare l'intero periodo di osservazione prescelto.

In dettaglio, quindi, gli input climatici richiesti, che siano osservati oppure generati, sono:

- Precipitazione cumulata giornaliera o sub giornaliera, espressa in mm. Nel caso in cui si utilizza il metodo dell'SCS Curve Number (SCS, 1972), come nel caso studio, si utilizzano i valori giornalieri.
- Temperature dell'aria massime e minime giornaliere, espresse in °C. La temperatura dell'aria è un dato necessario per il calcolo dell'evapotraspirazione, qualunque sia il metodo scelto per calcolare l'evapotraspirazione potenziale. SWAT permette di scegliere tra Penman-Monteith, Priestley-Taylor ed Hargreaves;
- Radiazione solare totale, espressa in MJ/m², necessaria per il calcolo dell'evapotraspirazione con i metodi di Penman-Monteith, Priestley-Taylor.
- Velocità del vento media giornaliera in m/s, richiesta per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale con il metodi di Penman-Monteith. SWAT ipotizza che i dati di velocità del vento siano riferiti ad una stazione posta ad 1,7 m da terra.
- Umidità relativa media giornaliera espressa come frazione, richiesta dai metodi di Penman-Monteith, Priestley-Taylor.

Gli input di SWAT possono avere differenti livelli di dettaglio; quelli climatici

sono degli input a livello di sottobacino poiché tutte le HRU appartenenti ad uno stesso sottobacino hanno lo stesso valore di input climatico, per esempio i dati di precipitazione e temperatura sono gli stessi per ciascuna HRU appartenente ad un determinato sottobacino.

Nel caso oggetto di studio, come sarà meglio illustrato nel prossimo capitolo, si è scelto di calcolare l'evapotraspirazione potenziale con il metodo di Hargreaves, vista la difficoltà nel reperire i dati di umidità relativa.

1.3.5 Land Phase: Intercettazione della vegetazione

Parte della precipitazione viene intercettata dalla vegetazione dove viene trattenuta e successivamente restituita all'atmosfera attraverso l'evaporazione. Questo fenomeno può influenzare fortemente l'infiltrazione, il ruscellamento superficiale e l'evapotraspirazione perché si traduce in una perdita di parte della precipitazione al suolo oltre che del potere erosivo della stessa. E' funzione della densità e della specie della vegetazione.

Nel caso in cui per il calcolo del ruscellamento superficiale si utilizza il metodo del Curve Number, (v. paragrafo 1.3.10), l'intercettazione fogliare è compresa nel termine di perdita iniziale, che vale in genere il 20% del termine di ritenzione idrica, insieme all'immagazzinamento superficiale ed all'infiltrazione antecedente il deflusso. Nel caso in cui, invece, si utilizza il metodo di Green & Ampt, la canopy storage va valutata separatamente. SWAT, infatti, permette di determinare il massimo contenuto d'acqua che può essere trattenuto dalla vegetazione variando quotidianamente l'indice di copertura fogliare.

La formula utilizzata è la seguente:

$$can_{day} = can_{mx} * \frac{LAI}{LAI_{mx}}$$

Dove can_{day} , espressa in mm di H₂O, è l'ammontare massimo di acqua che può essere trattenuta dalla copertura fogliare nel giorno i-esimo, can_{mx} è la stessa grandezza valutata quando la vegetazione è completamente sviluppata, LAI (Leaf Area Index) è l'indice di area fogliare nel giorno i-esimo mentre LAI_{mx} è quello massimo.

1.3.6 Land Phase: Infiltrazione

L' infiltrazione è un processo che ha luogo nella zona vadosa o insatura che coinvolge le acque di precipitazione che penetrano nel terreno raggiungendo, se le condizioni lo permettono, la zona satura.

Man mano che l'infiltrazione continua ed il suolo diventa bagnato, il tasso di infiltrazione diminuisce fino a raggiungere un valore costante. Il tasso di infiltrazione iniziale dipende dal contenuto di umidità iniziale mentre quello finale coincide con il coefficiente di conducibilità idraulica satura del suolo.

Con il metodo del Curve Number, operando con un passo temporale giornaliero, non è possibile modellare direttamente l'infiltrazione ed il totale di acqua che entra nel profilo del terreno è calcolato come differenza tra la precipitazione totale ed il runoff superficiale. Il metodo Green & Ampt, invece, permette di modellare direttamente l'infiltrazione ma richiede dei dati di precipitazione sub-giornaliera.

1.3.7 Land Phase: Redistribuzione

Con il termine redistribuzione ci si riferisce al fenomeno per il quale si ha un continuo movimento dell'acqua nel profilo del suolo dopo che la precipitazione è cessata. La causa di questo processo è dovuta ad i differenti contenuti di acqua che esistono all'interno del profilo del suolo; una volta che il l'acqua all'interno dell'intero profilo si è redistribuita in maniera uniforme, il processo termina.

SWAT calcola l'aliquota di redistribuzione utilizzando il metodo del ciclo di immagazzinamento per determinare il flusso d'acqua attraverso ogni strato del suolo nella zona radicale. Si ha un flusso discendente, detto percolazione, quando si oltrepassa la capacità di campo di uno strato e quelli sottostanti non sono ancora saturi. Questo processo è governato dalla conducibilità idraulica satura degli strati di suolo ed è fortemente dipendente dalla temperatura del suolo; in particolare, non si può aver redistribuzione in un determinato strato del suolo se la sua temperatura è uguale o inferiore a 0°C.

1.3.8 Land Phase: Evapotraspirazione

L'evapotraspirazione è un processo attraverso il quale l'acqua della superficie terrestre, allo stato liquido o solido, diventa vapore acqueo e passa in atmosfera.

L'evapotraspirazione include l'evaporazione dai fiumi, dai laghi e dal suolo nudo, la traspirazione delle piante e la sublimazione dei ghiacci e delle nevi. Essendo uno dei processi più importanti per i quali l'acqua fuoriesce dal bacino e non è più nella disponibilità umana, la stima dell'evapotraspirazione è un problema molto importante.

Il modello SWAT calcola separatamente la traspirazione della vegetazione e l'evaporazione dei suoli. L'evaporazione potenziale dal suolo è calcolata in funzione dell'evapotraspirazione potenziale e dell'indice di area fogliare, data dal rapporto tra l'area fogliare e la superficie dell'HRU. L'evaporazione reale dal suolo è quantificata per mezzo di funzioni esponenziali del contenuto d'acqua e della profondità del suolo.

L'evapotraspirazione potenziale (PET) è la quantità d'acqua che evaporerebbe dal suolo in maniera diretta oppure indiretta, tramite le piante, senza esaurimento delle riserve idriche; in SWAT si assume che non venga influenzata da processi microclimatici.

Nota l'evapotraspirazione potenziale, va determinata quella reale. SWAT calcola in prima battuta l'evaporazione della pioggia intercettata dalla copertura vegetale e successivamente la quantità massima della traspirazione e della sublimazione del suolo, usando un approccio simile a quello di Richey (1972).

Tra i numerosi metodi esistenti per il calcolo della PET, SWAT include tre metodi: il metodo di Penman-Monteith (1965), quello di Priestley-Taylor (1972) ed il metodo di Hargreaves (1985).

Questi tre metodi differiscono per i parametri di input richiesti. Il metodo più esigente è quello di Penman-Monteith che richiede radiazione solare, temperatura dell'aria, umidità relativa e velocità del vento; Priestley-Taylor richiede invece gli stessi dati, meno la velocità del vento. Infine, il metodo di Hargreaves è il più parco, in quanto necessita soltanto della temperatura dell'aria.

Tra questi tre metodi, come sarà meglio specificato in seguito, si è scelto di utilizzare il metodo di Hargreaves, data la difficoltà nel reperire informazioni riguardanti soprattutto l'umidità relativa.

La formula utilizzata dal modello SWAT è la seguente:

$$\lambda E_0 = 0.0023 * H_0 * (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} * (\overline{T_{av}} + 17.8)$$

Dove:

- E_0 [mm/d] è l'evapotraspirazione potenziale;
- λ [MJ/kg] è il calore latente di vaporizzazione;
- H_0 [MJ/(m²*d)] è la radiazione solare extraterrestre;
- T_{mx} [°C] è la temperatura dell'aria massima per un dato giorno;
- T_{mn} [°C] è la temperatura dell'aria minima per un dato giorno;
- $\overline{T_{av}}$ [°C] è il valore medio della temperatura dell'aria per un dato giorno.

1.3.9 Land Phase: Deflusso laterale sub-superficiale

L'apporto al deflusso in alveo dovuto alle acque che scorrono nella porzione di terreno inferiore allo strato superficiale ma superiore alla zona satura d'acqua è detto deflusso laterale sub-superficiale.

In SWAT, il deflusso laterale è calcolato, simultaneamente alla redistribuzione e per ogni strato di terreno, tramite il modello cinematico di Sloan e Moore (1984) che tiene conto delle variazioni di conducibilità idraulica, pendenza e contenuto d'acqua nel suolo. Il deflusso laterale, infatti, è particolarmente importante in quei suoli caratterizzati da alta conducibilità idraulica negli strati più superficiali e da strati impermeabili o semi-permeabili a profondità non troppo elevate. In queste condizioni, infatti, si crea prima un flusso discendente d'acqua (percolazione) che termina quando raggiunge lo strato impermeabile. Qui l'acqua ristagna fino a formare una zona satura d'acqua che diventa la fonte del deflusso laterale sub-superficiale.

1.3.10 Land Phase: Deflusso superficiale

Il deflusso superficiale è il deflusso che si ha lungo una superficie inclinata di una certa pendenza per effetto della forza di gravità. Si ha deflusso superficiale quando l'intensità di pioggia è maggiore della velocità di infiltrazione. Inizialmente, quando il suolo è asciutto, la velocità di infiltrazione è generalmente molto alta mentre decresce man mano che il suolo diventa più bagnato. Quando l'intensità di pioggia diventa più alto del tasso di infiltrazione, prima cominciano a riempirsi d'acqua le depressioni nel terreno ed, una volta che sono piene, comincia il deflusso superficiale. Usando i dati di precipitazione giornaliera o sub-giornaliera, SWAT simula i volumi di deflusso superficiale ed i valori di picco per ciascuna HRU.

In SWAT i volumi di deflusso superficiale sono calcolati utilizzando il metodo dell'SCS Curve Number (USDA Soil Conservation Service, 1972) oppure il metodo dell'infiltrazione di Green & Ampt (Green & Ampt, 1911). Nel primo metodo, il Curve Number varia in maniera non lineare in funzione del contenuto di umidità del terreno; per terreni vicini al punto di appassimento il Curve Number diminuisce mentre tende a 100 quando il suolo è vicino alla saturazione. Il metodo di Green & Ampt richiede, invece, dati di precipitazione sub-giornalieri e calcola l'infiltrazione come una funzione del potenziale matriciale del fronte umido e della conducibilità idraulica effettiva. L'acqua che non si infiltra da luogo al ruscellamento superficiale.

Nel lavoro oggetto di studio si è utilizzato il metodo del Curve Number poiché i dati di precipitazioni utilizzati sono a scala giornaliera.

Il metodo del Curve Number (CN), sviluppato dal Soil Conservation Service (SCS) del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, è considerato uno dei metodi empirici più importanti utilizzabili per la stima dei deflussi superficiali. Il modello esamina la risposta idrologica di un bacino per la stima del deflusso superficiale relativa a usi del suolo e tipologie di suolo differenti.

Il metodo dell'SCS Curve Number propone l'equazione:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{R_{day} - I_a + S}$$

Dove:

- Q_{surf} [mm] è il deflusso superficiale o pioggia efficace;
- R_{day} [mm] è la pioggia cumulata giornaliera;
- I_a [mm] è la perdita iniziale che include l'immagazzinamento superficiale, l'intercettazione della vegetazione e l'infiltrazione prima del deflusso;
- S [mm] è il volume specifico di saturazione.

La perdita iniziale I_a , come detto precedentemente, rappresenta un'aliquota di pioggia sottratta a priori al bilancio in esame ed è complicata da stimare poiché comprende vari fenomeni quali intercettazione della vegetazione, infiltrazione ed immagazzinamento superficiale, dipendenti da altrettanti fattori. Per ovviare a questo problema, nel metodo del Curve Number si esprime I_a come una percentuale del volume specifico di saturazione. Si pone, quindi:

$$I_a = 0.2 * S$$

Il volume specifico di saturazione S varia in funzione della natura del terreno, dell'uso del suolo, delle pratiche gestionali, della pendenza e del contenuto d'acqua del suolo precedente l'evento meteorico, globalmente rappresentati dal parametro CN , secondo la relazione:

$$S = 25.4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right), \quad \text{con } 0 < CN \leq 100$$

Di conseguenza, il modello risulta essere dipendente da un solo parametro ovvero CN , il Curve Number giornaliero, per il tramite di S , che riassume l'attitudine propria e specifica del suolo a produrre deflusso.

Come si evince dalla figura sottostante, che rappresenta la soluzione grafica dell'equazione del Curve Number, per $CN=100$ il deflusso superficiale è uguale alla precipitazione cumulata e l'infiltrazione è nulla (suoli completamente saturi) mentre, per $CN=0$ non si ha deflusso e la retta coincide con l'asse delle ascisse (suoli completamente permeabili).

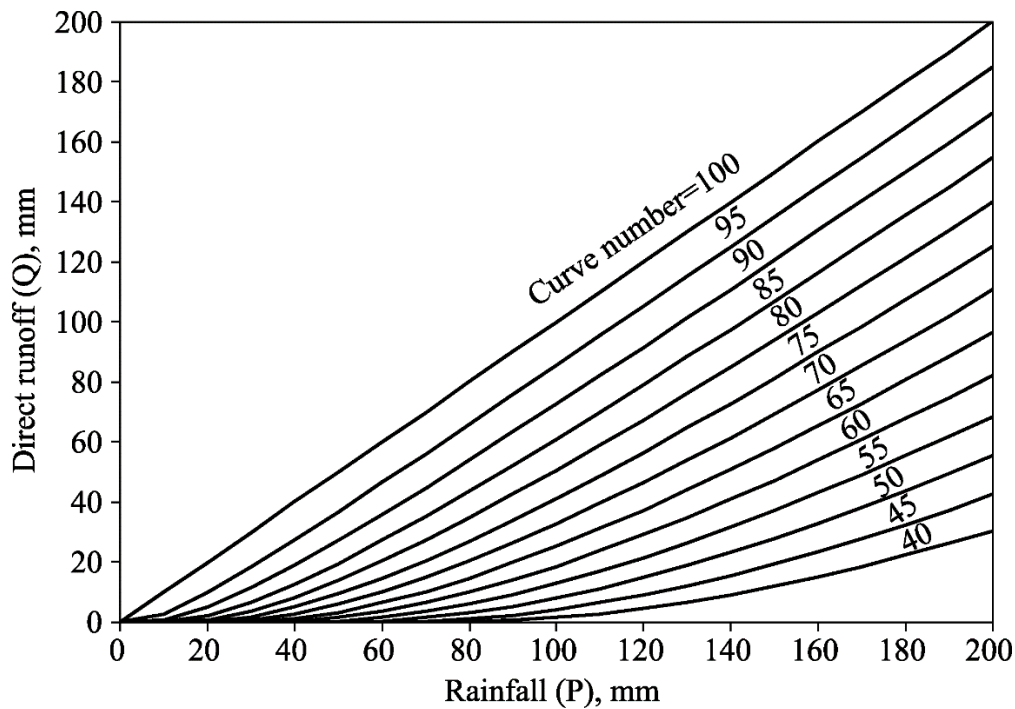


Figura 3: Influenza del parametro CN nella stima del volume di deflusso superficiale (Cronshey, 1986).

L'SCS Curve Number è una funzione della tipologia di suolo, dell'uso del suolo e del grado di umidità del terreno antecedente l'evento meteorico.

Per quanto riguarda la tipologia litologica del terreno, l'U.S. Natural Resource Conservtion Service (NRCS) classifica i suoli in quattro classi idrologiche che si differenziano per le caratteristiche di infiltrazione del suolo. Il Soil Survey Staff (1996) definisce come gruppo idrologico l'insieme di tutti quei suoli aventi deflussi potenziali molto simili tra loro a parità di condizioni di copertura del suolo e precipitazione. I quattro gruppi individuati sono:

- Gruppo A. Comprende tutti i suoli che hanno scarse potenzialità di deflusso; sono dei suoli caratterizzati da un tasso di infiltrazione molto elevato, anche nel caso in cui sono completamente saturi. I suoli appartenenti al gruppo A sono per lo più delle sabbie e delle ghiaie profonde, caratterizzate da alta permeabilità ed elevata velocità di trasmissione dell'acqua.
- Gruppo B. Comprende suoli caratterizzati da potenzialità di deflusso moderatamente basse, ossia suoli aventi un moderato tasso di infiltrazione allorché sono completamente saturi. La velocità di trasmissione dell'acqua di questo tipo di suoli è perciò moderata.

- Gruppo C. I suoli appartenenti a questo gruppo, nel caso in cui risultano completamente saturi, hanno una bassa velocità di infiltrazione. Spesso possiedono uno strato argilloso che impedisce all'acqua di percolare ed hanno tessitura moderatamente fine. La permeabilità di questi suoli è bassa.
- Gruppo D. I suoli di questo gruppo hanno elevate potenzialità di deflusso poiché la loro velocità di infiltrazione è molto ridotta quando sono completamente saturi. Sono per lo più suoli argillosi, con un'alta capacità di rigonfiamento, suoli permanentemente bagnati con orizzonti quasi impermeabili in prossimità della superficie. All'interno di questi suoli la velocità di trasmissione dell'acqua è molto bassa.

Per quanto riguarda lo stato di umidità antecedente l'evento meteorico, l'SCS definisce tre classi: I (secco), II (umidità media) e III (bagnato) a seconda di quanti mm di pioggia siano piovuti nei 5 giorni antecedenti l'evento meteorico. I valori del CN per la condizione di umidità più tipica, ossia quella media ($CN(II)$), sono poi forniti in delle tabelle (SCS Engineering Division, 1986), riportate nelle pagine seguenti, in funzione del tipo di uso del suolo e del tipo di suolo. Per adattare poi il CN ai differenti stati di umidità si usano le seguenti equazioni:

$$CN(I) = CN(II) - \frac{20 * (100 - CN(II))}{100 - CN(II) + \exp[2.533 - 0.0636 * (100 - CN(II))]}$$

$$CN(III) = CN(II) * \exp[0.00673 * (100 - CN(II))]$$

Tabella 1-1. Runoff curve numbers for cultivated agricultural lands^L (210-VI-TR-55, Second Ed., June 1986).

----- Cover description -----			Curve numbers for --hydrologic soil group --			
Cover type	Treatment ^{2/}	Hydrologic condition ^{3/}	A	B	C	D
Fallow	Bare soil	—	77	86	91	94
	Crop residue cover (CR)	Poor	76	85	90	93
		Good	74	83	88	90
Row crops	Straight row (SR)	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	SR + CR	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	Contoured (C)	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	C + CR	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	Contoured & terraced (C&T)	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81
	C&T+ CR	Poor	65	73	79	81
		Good	61	70	77	80
Small grain	SR	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	SR + CR	Poor	64	75	83	86
		Good	60	72	80	84
	C	Poor	63	74	82	85
		Good	61	73	81	84
	C + CR	Poor	62	73	81	84
		Good	60	72	80	83
	C&T	Poor	61	72	79	82
		Good	59	70	78	81
	C&T+ CR	Poor	60	71	78	81
		Good	58	69	77	80
Close-seeded or broadcast	SR	Poor	66	77	85	89
		Good	58	72	81	85
legumes or rotation	C	Poor	64	75	83	85
		Good	55	69	78	83
meadow	C&T	Poor	63	73	80	83
		Good	51	67	76	80

¹ Average runoff condition, and $I_a=0.2S$

² Crop residue cover applies only if residue is on at least 5% of the surface throughout the year.

³ Hydraulic condition is based on combination factors that affect infiltration and runoff, including (a) density and canopy of vegetative areas, (b) amount of year-round cover, (c) amount of grass or close-seeded legumes, (d) percent of residue cover on the land surface (good $\geq 20\%$), and (e) degree of surface roughness.

Poor: Factors impair infiltration and tend to increase runoff.

Good: Factors encourage average and better than average infiltration and tend to decrease runoff.

Tabella 1-2. Runoff curve numbers for other agricultural lands¹ (210-VI-TR-55, Second Ed., June 1986).

----- Cover description ----- Cover type	Hydrologic condition	Curve numbers for --hydrologic soil group --			
		A	B	C	D
Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing. ²	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow—continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay.	—	30	58	71	78
Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element. ³	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30 ⁴	48	65	73
Woods—grass combination (orchard or tree farm). ⁵	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods. ⁶	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30 ⁴	55	70	77
Farmsteads—buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.	—	59	74	82	86

¹ Average runoff condition, and $I_a = 0.2S$.

² *Poor:* <50% ground cover or heavily grazed with no mulch.

Fair: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed.

Good: > 75% ground cover and lightly or only occasionally grazed.

³ *Poor:* <50% ground cover.

Fair: 50 to 75% ground cover.

Good: >75% ground cover.

⁴ Actual curve number is less than 30; use CN = 30 for runoff computations.

⁵ CN's shown were computed for areas with 50% woods and 50% grass (pasture) cover. Other combinations of conditions may be computed from the CN's for woods and pasture.

⁶ *Poor:* Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning.

Fair: Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil.

Good: Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.

Tabella 1-3. Runoff curve numbers for urban areas¹ (210-VI-TR-55, Second Ed., June 1986).

Cover description	Average percent impervious area	Curve numbers for hydrologic soil group			
		A	B	C	D
<i>Fully developed urban areas (vegetation established)</i>					
Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.):					
Poor condition (grass cover < 50%)		68	79	86	89
Fair condition (grass cover 50% to 75%)		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%)		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Paved; open ditches (including right-of-way)		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way)		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way)		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only)		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders)		96	96	96	96
Urban districts:					
Commercial and business	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size:					
1/8 acre or less (town houses)	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acres	12	46	65	77	82
<i>Developing urban areas</i>					
Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation)					
		77	86	91	94
Idle lands (CN's are determined using cover types similar to those in table 2-2c).					

¹ Average runoff condition, and $I_a = 0.2S$.

1.3.11 Routing Phase

Dopo la Land Phase, in cui, come detto precedentemente, rientrano i processi che determinano il trasferimento della risorsa idrica dalla superficie del sottobacino al network di drenaggio, SWAT simula anche la Routing Phase, ossia il movimento dell'acqua all'interno della rete idrografica del bacino, fino alla sezione di chiusura.

SWAT, infatti, simula diversi fenomeni che, all'interno della rete di drenaggio, possono provocare un aumento o una diminuzione del flusso d'acqua trasportato, variandone costantemente la quantità.

Parte dell'acqua che scorre all'interno delle varie aste fluviali, infatti, viene persa per evaporazione e trasmissione attraverso il fondo dell'alveo; mentre la pioggia che cade direttamente sul fiume ne aumenta la portata, seppur di poco. Un'altra potenziale perdita si può avere a causa del prelievo di acqua ad uso civile così come si possono avere delle immissioni di scarichi puntuali dovuti a fogne, centrali o industrie. Questi fenomeni antropici possono esser considerati all'interno del modello tramite l'individuazione di punti di Inlet/Outlet a cui vengono associati delle portate note, in entrata o in uscita. In questo lavoro, però, non sono stati presi in considerazione, data la complessità nell'inserire queste portate e la vasta scala del bacino considerato.

Il flusso all'interno dei canali è una corrente a superficie libera e SWAT utilizza l'equazione di Manning per determinare portate e velocità. La propagazione dei deflussi è simulata attraverso due metodologie, entrambe variazioni del modello di onda cinematica: il metodo di Muskingum (Napiorkowski, 1981) ed il metodo del coefficiente di accumulo variabile (Variable Storage) (Williams, 1969).

2 IL CASO DI STUDIO

2.1 La regione idrografica Piemonte-Valle D'Aosta

L'area di studio è la regione idrografica Piemonte-Valle D'Aosta che coincide per lo più con i confini amministrativi delle due Regioni, ad esclusione della porzione nordoccidentale dell'area, dove comprende anche parte della Lombardia e della Svizzera. Quest'area, dove si trovano il Lago Maggiore, il Lago d'Orta ed i bacini dei fiumi Toce e Ticino, seppur presente all'interno del modello, non è stata presa in considerazione poiché non è stata trattata la presenza dei laghi e perché si è scelta come sezione di chiusura del bacino quella del Po ad Isola Sant'Antonio, la cui superficie drenata non comprende i bacini di Toce e Ticino.

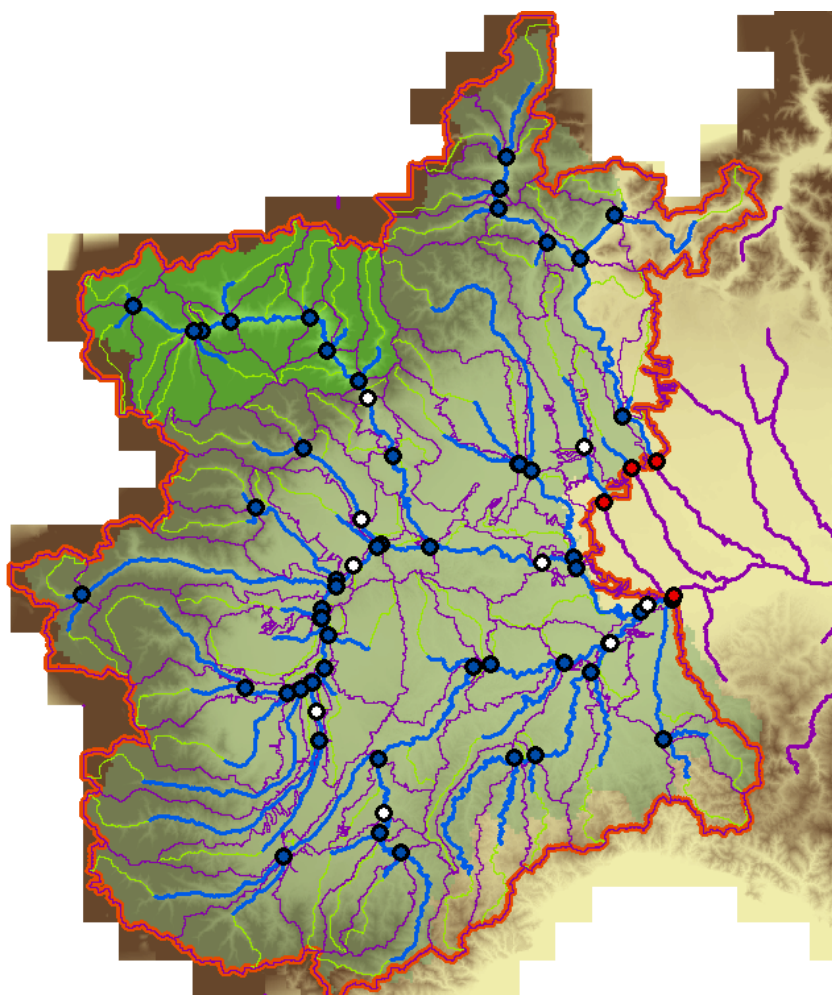


Figura 2-1. Area di studio tratta da ArcSwat.

L'area di studio comprende un'ampia ed eterogenea area al cui interno ricadono dei bacini molto diversi in termini di quota media e più in generale di

altitudine e caratteristiche climatiche. Tutto ciò si traduce in una diversificazione dei regimi, sia in termini di afflusso che di deflusso. Dall'alto al basso, in termini di altitudine, i tipi di regime di deflusso cambiano; si va da un regime con un singolo picco nei mesi estivi per effetto dello scioglimento della neve, tipico dei bacini alpini, ad un altro con un secondo picco nei mesi autunnali, caratteristico dei bacini di media altitudine.

L'intera regione idrografica di Piemonte e Valle d'Aosta, oggetto del lavoro di tesi, ricade all'interno del bacino del Po, il più grande ed importante d'Italia sia per superficie e lunghezza dell'asta principale (650 km di cui 274 fino ad Isola Sant'Antonio) che per portata. Il fiume Po nasce alle pendici del Monviso a 2100 m s.l.m. e si dirige in un primo momento verso nord per poi convergere ad est, da Chivasso a Casale Monferrato, dove devia verso sud fino a Valenza ed, infine, nuovamente ad est, dove vi è la confluenza del Tanaro ed immediatamente a valle, Isola Sant'Antonio (Al). Le caratteristiche principali della stazione di misura e del bacino del Po ad Isola Sant'Antonio sono riportate nella tabella sottostante. Ulteriori caratteristiche del bacino saranno trattate successivamente, negli opportuni paragrafi.

	UTM_X_ WGS84 [m]	UTM_Y_ WGS84 [m]	Quota sito [m]	Sup. Bacino [km ²]	Quota media [m]	Pend. media [%]
Isola Sant'Antonio Po	485974	4986982	76	25640	959	13.5

Tabella 2-1. Caratteristiche del sito della sez. di chiusura e del bacino del Po ad Isola Sant'Antonio (Al).

A seconda delle caratteristiche naturalistiche all'interno del bacino considerati si possono individuare tanti "sistemi di paesaggio"; la pianura piemontese, nella cui parte bassa si trovano le risaie; il sistema prealpino, caratterizzato da rocce sedimentarie marine per lo più carbonatiche, corsi d'acqua sotterranei e paesaggi accidentati; le colline del Monferrato e delle Langhe, coltivate soprattutto a vigneti; il paesaggio fluviale del Po ed infine i grandi massicci alpini e le valli che, dalla Liguria nordoccidentale alla Valle D'Aosta, formano una lunga fascia di montagna ad arco dove troviamo i massicci dell'Argentara, del Gran Paradiso, del Monte Rosa e del Monte Bianco.

2.2 I dati di input richiesti

I dati richiesti da SWAT per la costruzione di un modello di bilancio idrico sono:

- Il modello digitale del terreno (DEM);
- La mappa del reticolo idrografico;
- La carta di uso del suolo;
- La carta ed il database dei tipi di suoli;
- I dati climatici giornalieri: precipitazioni, temperature, radiazione solare, umidità relativa e velocità del vento;
- I dati misurati di portata per la calibrazione e la validazione del modello.

I modelli idrologici richiedono una grande quantità di dati che dipendono dalla scala e dalla risoluzione del modello. La ricerca e la preparazione di questi dati per il modello è una delle fasi più impegnative del lavoro, soprattutto in termini di tempo. Infatti, c'è bisogno di una gran mole di dati, di diversa tipologia, e di adeguata copertura temporale, per quanto riguarda le serie storiche dei dati meteorologici che idrologici.

Per quanto riguarda i dati meteorologici, si è provato ad interrogare diverse banche dati con risultati non eccezionali, in quanto in talune vi erano grandi lacune temporali, in altre i dati non erano pubblici ed in altre ancora risultava complicata la fruibilità e l'adattamento dei dati al modello. Nello specifico, è risultato molto difficile, se non impossibile, reperire dei buoni dati di umidità relativa, motivo per cui si è scelto di utilizzare Hargreaves per il calcolo della PET.

A livello di Regione Piemonte in particolare, è risultato molto utile e particolarmente adatto allo scopo prefissato, il dataset NWOI, mantenuto quotidianamente aggiornato dal Dipartimento Sistemi Previsionali di Arpa Piemonte e contenente i dati giornalieri dell'analisi su griglia regolare di temperatura massima, minima e precipitazione cumulata relativi al Piemonte.

Per quanto riguarda, invece, i database di suolo ed utilizzo del suolo, è stato

possibile reperire dei dati grazie a delle banche dati europee come il Corine Land Cover e l'European Soil Database che, grazie a vari progetti ed iniziative europee finalizzati allo sviluppo di metodi e strumenti d'analisi a sostegno dell'opera di pianificazione territoriale, sono stati creati ed implementati nel corso del tempo.

2.2.1 Il modello digitale del terreno ed il reticolo idrografico

Il modello digitale d'elevazione (DEM) e la mappa dei bacini e del reticolo idrografico sono state ricavate dalla rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale (SINA.net), gestito dall'ISPRA.

Sono stati scaricati i dati riguardanti l'intera superficie italiana, in quanto ArcSwat permette di inserire una "mask" in un secondo momento, in fase di Stream Definition, e di riferirsi soltanto ad una porzione del DEM di partenza.

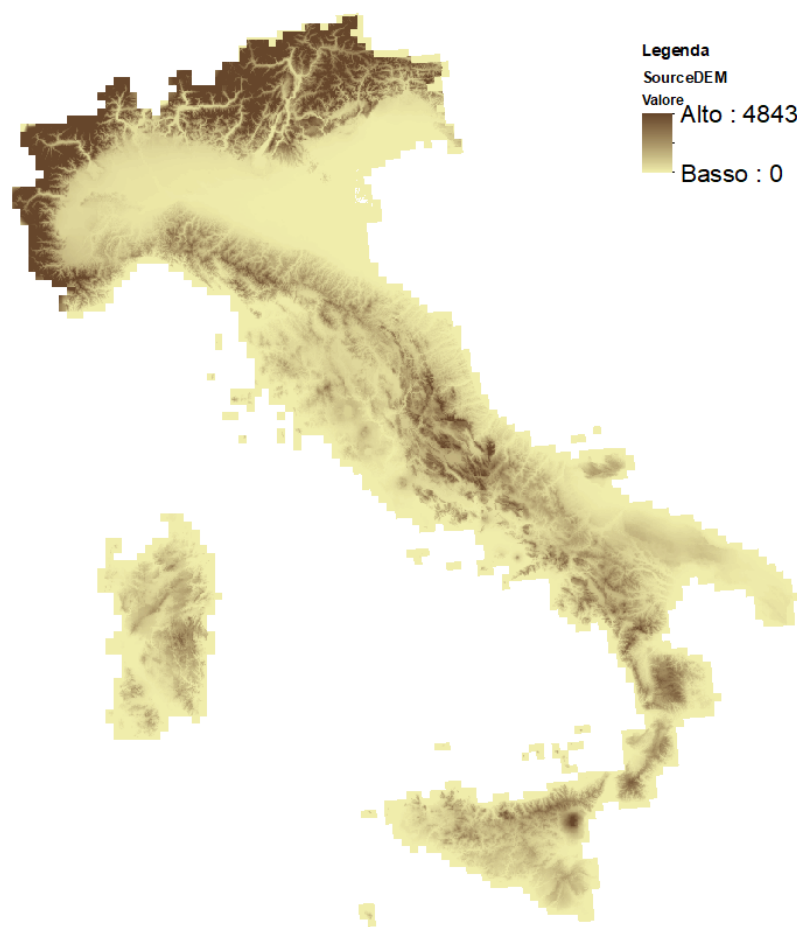


Figura 2-2. Modello digitale di elevazione a 20m.

Il sistema di proiezione cartografica utilizzato per il file ESRI GRID del modello digitale di elevazione a 20 m (v. Figura 2-2) è il WGS84 / UTM zone 32N, adottato poi successivamente per ogni altra tipologia di dato inserita.

Tra queste c'è la mappa dei bacini secondari e del reticolo idrografico, entrambe in scala 1:250000, sempre scaricati dal geoportale ISPRA, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. La mappa del reticolo idrografico è stata utilizzata per l'operazione di "Burn-in" in fase di pre-processamento del DEM, che sarà illustrata meglio nel paragrafo 2.3.1. Quella dei bacini, invece, è utile per fare un confronto con i bacini individuati in automatico dal modello SWAT e controllare che questa procedura risulti corretta.

2.2.2 La carta di uso dei suoli CLC

I dati di uso del suolo sono stati ricavati dal database CORINE LAND COVER.

Il programma CORINE (Coordination of Information on the Environment) fu lanciato dal Consiglio dell'Unione Europea nel 1985, con lo scopo di produrre degli studi sullo stato dell'ambiente all'interno dell'Unione al fine di fornire un aiuto tecnico per le decisioni politiche di tutela del clima e del territorio.

All'interno di questo progetto, il Corine Land Cover (CLC) è nato con lo scopo di rilevare e monitorare le caratteristiche di copertura ed uso del suolo.

Il programma è stato gestito dall'Agenzia Europea per l'Ambiente e da varie agenzie nazionali, per l'Italia l'APAT, adesso ISPRA. La prima versione del CLC risale al 1990, seguita da numerosi aggiornamenti nel 2000, 2006, 2012 e 2018 che ne hanno aumentato la precisione e l'estensione che ad oggi coinvolge 38 Paesi EU ed Extra-EU.

Il progetto CLC ha previsto l'implementazione di un inventario della copertura del suolo, proposto come una cartografia in scala 1:100.000, strutturato secondo livelli gerarchici; attualmente ve ne sono 4 ma per questo studio si è utilizzato il 3° Livello, composto da 44 classi di copertura del suolo. La cartografia è composta da tante unità spaziali omogenee e significative rispetto alla scala

considerata. L'area della più piccola unità mappata nel progetto, ossia l'unità di mappatura minima (MMU), è di 25 ettari, che in una scala 1:100.000 è rappresentata da un quadrato di lato 5 mm o un cerchio di raggio 2.8 mm.

La mappa digitalizzata del CLC costituisce la base di riferimento geografico e tematico del Sistema Informativo CORINE.

Per la costruzione del Corine Land Cover sono state prodotte delle immagini satellitari in falso colore. Il metodo utilizzato per l'identificazione dei vari usi del suolo è stato la fotointerpretazione assistita da calcolatore seguita, dopo un controllo sulla qualità della stessa, dalle fasi di digitalizzazione e validazione dei dati. Questi ultimi, in fase finale, sono stati resi pubblici.

Come già detto precedentemente, per il lavoro oggetto di tesi, si è utilizzato il 3° Livello del Corine Land Cover; mentre il primo livello conta di 5 classi generali (territori modellati artificialmente, territori agricoli, territori boscati e ambienti semi-naturali, zone umide, corpi idrici) ed il secondo è composto da 15 voci, il terzo comprende 44 differenti classi di suolo, adatte ad una scala 1:100.000.

All'interno di SWAT vi è un database di default composto da differenti classi di uso del suolo, alle quali sono associati una serie di parametri richiesti dal programma. E' stato quindi necessario associare le diverse classi del CLC alle corrispondenti classi presenti nei database di usi del suolo "Crop" ed "Urban" presenti in SWAT.

Nella tabella sottostante è riportata, appunto, la legenda del Corine Land Cover con il codice identificativo della corrispettiva classe di uso del suolo associata presente in SWAT.

1 Territori modellati artificialmente	Cod. SWAT
1.1. Zone urbanizzate	
1.1.1. Tessuto urbano continuo	URBN
1.1.2. Tessuto urbano discontinuo	URBN
1.2. Zone industriali, commerciali e reti comunicazione	
1.2.1. Aree industriali o commerciali.	UIDU
1.2.2. Reti stradali e ferroviarie e spazi accessori.	UTRN
1.2.3. Aree portuali.	UTRN
1.2.4. Aeroporti.	UTRN
1.3. Zone estrattive, discariche e cantieri	
1.3.1. Aree estrattive.	UIDU

1.3.2. Discariche.	UIDU
1.3.3. Cantieri.	UIDU
1.4. Zone verdi artificiali non agricole	
1.4.1. Aree verdi urbane.	URBN
1.4.2. Aree sportive e ricreative.	URBN
2 Territori agricoli	
2.1. Seminativi	
2.1.1. Seminativi in aree non irrigue.	AGRL
2.1.2. Seminativi in aree irrigue.	AGRL
2.1.3. Risaie.	RICE
2.2. Colture permanenti	
2.2.1. Vigneti.	GRAP
2.2.2. Frutteti e frutti minori.	APPL
2.2.3. Oliveti.	OLIV
2.3. Prati stabili	
2.3.1. Prati stabili	RNGE
2.4. Zone agricole eterogenee	
2.4.1. Colture annuali associate a colture permanenti	AGRL
2.4.2. Sistemi colturali e particellari complessi.	AGRL
2.4.3. Aree prev. occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti.	AGRL
2.4.4. Aree agroforestali.	AGRL
3 Territori boscati	
3.1. Zone boscate	
3.1.1. Boschi di latifoglie.	FRSD
3.1.2. Boschi di conifere.	PINE
3.1.3. Boschi misti.	FRST
3.2. Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	
3.2.1. Aree a pascolo naturale e praterie d'alta quota.	RNGB
3.2.2. Brughiere e cespuglieti.	RNGB
3.2.3. Aree a vegetazione sclerofilla.	RNGB
3.2.4. Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione.	FRST
3.3. Zone aperte con vegetazione rada o assente	
3.3.1. Spiagge, dune, sabbie (più larghe di 100 m).	SWRN
3.3.2. Rocce nude, falesie, rupi affioramenti.	RNGB
3.3.3. Aree con vegetazione rada.	RNGB
3.3.4. Aree percorse da incendi.	SWRN
3.3.5. Ghiacciai e nevi perenni.	WATR
4 Zone umide	
4.1. Zone umide interne	
4.1.1. Paludi interne.	WETN
	WETL
4.2. Zone umide marittime.	
4.2.1. Paludi salmastre.	WETN
4.2.2. Saline.	WETN
4.2.3. Zone intertidali.	WETN

5 Corpi idrici	
5.1. Acque continentali	
5.1.1. Corsi d'acqua, canali e idrovie.	WATR
5.1.2. Bacini d'acqua.	WATR
5.2. Acque marittime	
5.2.1. Lagune.	WATR
5.2.2. Estuari.	WATR
5.2.3 Mari e Oceani.	WATR

Tabella 2-2. Classi di uso del suolo del Corine Land Cover e corrispondente in SWAT.

2.2.3 L'ESDB e le proprietà del suolo derivate

I dati sui suoli e le loro caratteristiche sono state ricavate dall' European Soil Database; in particolare dal SGDBE (Soil Geographical Database of Eurasia) versione 4 che è la mappa digitalizzata dei suoli Europei e dei relativi attributi in scala 1:1.000.000, dal SPADE (Soil Profile Analytical Database for Europe) versione 2 e dall' EU-SoilHydroGrids per quanto riguarda le caratteristiche idrauliche dei suoli.

IL SGDBE è il risultato di un progetto di collaborazione tra tutti gli Stati dell'Unione Europea e dei Paesi confinanti, coordinati dall' ESB European Soil Bureau, ed ha lo scopo di fornire una rappresentazione della variabilità spaziale dei suoli e delle loro caratteristiche pedologiche, utili negli studi e nelle modellazioni agrometeorologiche a scale differenti, da locali a continentali. La terminologia usata per codificare i suoli è quella della Soil Map of the World della F.A.O, aggiustata e perfezionata per tener conto delle specifiche dei suoli Europei.

All'interno del database si trova la lista delle STU (Soil Typological Units), ovvero delle unità di suolo identificate e caratterizzate tramite una serie di parametri che descrivono la natura e le proprietà del suolo. Alla scala utilizzata, però, non è possibile identificare tutte le STU; per questo motivo le STU vengono raggruppate in delle SMU (Soil Mapping Units) a cui viene associato un poligono sulla mappa. Questo è un po' un limite della mappa perché per ciascuna SMU è indicata la % d'area occupata dalle varie STU ma non è possibile risalire alla posizione realmente occupata dalla STU all'interno della SMU.

Organisation of information in the Soil Geographical Data Base

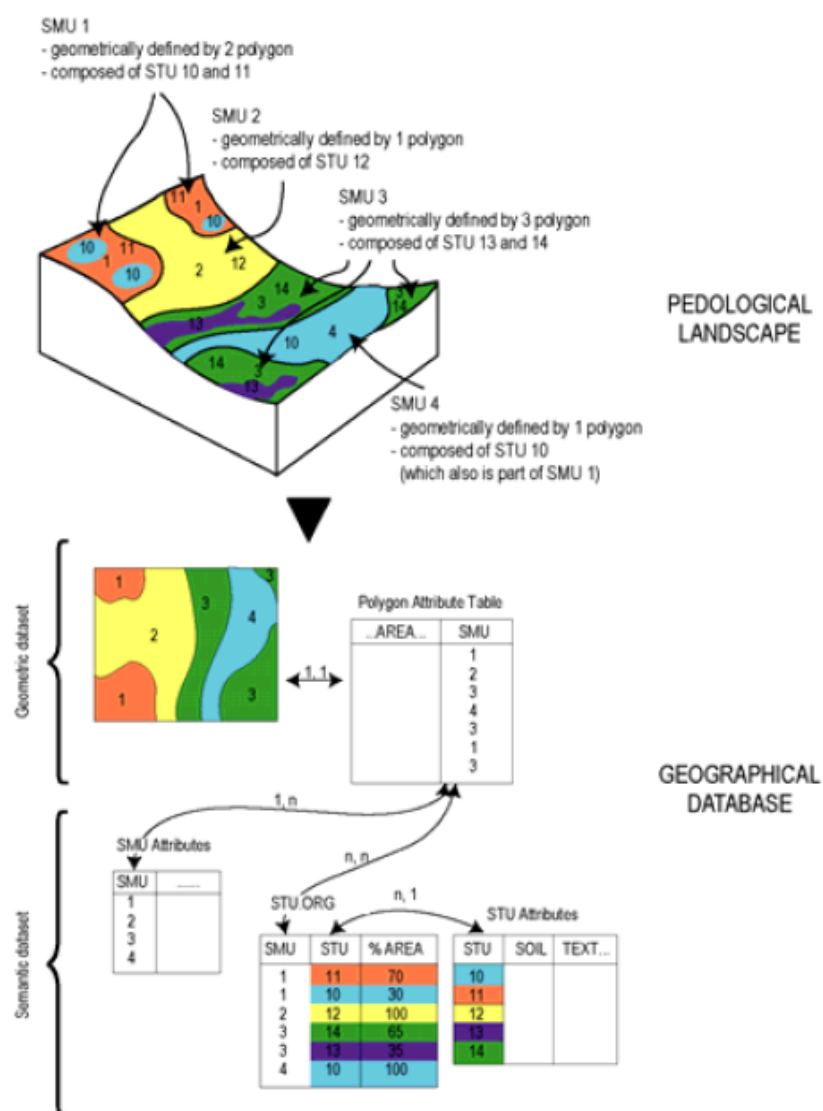


Figure 2-1. Struttura dei dati dell'European Soil Database.

Al SGDBE è poi associato il SPADE-2, ossia un database contenente le proprietà del suolo considerate primarie di ciascuna STU quali la % delle varie classi granulometriche, il pH, la bulk density ed altre ancora. I dati vengono raccolti da ciascuna Nazione partecipante al progetto e poi armonizzati e validati dall'European Soil Bureau.

Per quanto riguarda le proprietà idrauliche dei suoli, invece, si è utilizzato il 3D Soil Hydraulic Database of Europe at 250 m Resolution (Tóth, B., Weynants, M., Pásztor, L., Hengl, T. 2017.). Quest'ultimo è un database idraulico del suolo

a 7 livelli di profondità, fino a 2 m, basato sui dati ricavati dal SoilGrids250m e sulle funzioni di Pedotransfer (PTF) per la stima indiretta delle proprietà idrauliche dei suoli dell'UE (Tóth et al., 2015). Le proprietà contenute nel database sono il contenuto d'acqua satura, il contenuto d'acqua a capacità di campo ed al punto di appassimento, e la conducibilità idraulica satura. Il formato dei dati è GeoTIFF e per l'estrapolazione degli stessi sono state utilizzate direttamente le funzioni di Geoprocessing di ArcMap, andando a sovrapporre al GeoTIFF le STU e calcolando per ciascuna STU il valore medio della proprietà desiderata tramite gli strumenti di statistiche zonali.

SWAT per funzionare richiede una serie di caratteristiche del suolo, alcune necessarie ed altre opzionali. Tutte le tipologie di suolo individuate dalle STU del SGDBE ricadenti nella Regione idrografica Piemonte-Valle D'Aosta sono state aggiunte al database di default di SWAT. Nella tabella sottostante sono riportate le variabili richieste, il codice identificativo nel database di SWAT ed il corrispondente nell'European Soil Database.

Variabile	Cod. SWAT		Cod. ESDB
Gruppo Idrologico del Suolo	HYDRGRP	-	HG (Da SGDBE)
Profondità massima di radicazione	SOL_ZMX	mm	ROO (Da SGDBE)
Profondità del fondo dello strato	SOL_Z (Layer #)	mm	DEPTH_LO (Da SPADE2)
Densità apparente	SOL_BD (Layer #)	g/cm ³	DB (Da SPADE2)
Capacità d'acqua disponibile	SOL_AWC (Layer #)	mm H ₂ O/mm soil	WCFC-WCWP (Da 3D SHD)
Conducibilità idraulica satura	SOL_K (Layer #)	mm/h	KS (Da 3D SHD)
Contenuto di carbonio organico	SOL_CBN (Layer #)	% soil weight	OC (Da SPADE2)
Contenuto di argilla (<0.0002mm)	SOL_CLAY (Layer #)	% soil weight	CLAY (Da SPADE2)
Contenuto di limo (>0.002mm&<0.05mm)	SOL_SILT (Layer #)	% soil weight	SILT (Da SPADE2)
Contenuto di sabbia (>0.05mm&<2mm)	SOL_SAND (Layer #)	% soil weight	SAND (Da SPADE2)
Frazione rocciosa (<2mm)	SOL_ROCK (Layer #)	% total weight	STONES (Da SPADE2)
Fattore di erodibilità del suolo	USLE_K (Top Layer)	0.013 (ton m ² h)/(m ³ ton cm)	Dalla for. di Wischmeier et al. (1971)

Tabella 2-3. Proprietà del suolo richieste da SWAT

2.2.4 I dati climatici ARPA Piemonte

Per quanto riguarda i dati meteorologici si è utilizzato il dataset su griglia NWIOI (North Western Italy Optimal Intepolation) dell’Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente del Piemonte. Questo dataset è composto dai dati di precipitazione cumulata giornaliera, temperatura massima e minima giornaliere nell’ l’intervallo temporale che parte dal 01/12/1957 ed fino alla giornata antecedente la data di scaricamento.

La metodologia statistica impiegata per creare questo dataset è basata sulla tecnica dell’optimal interpolation (OI), in particolare il metodo usato è un’implementazione dell’OI, descritta nel dettaglio da Uboldi et al. (2008) e qui solo accennato. Questo metodo in particolare differisce dal Kriging perché utilizza un campo di appoggio meteorologico, detto di background. L’algoritmo quindi produce il campo d’interpolazione a partire dal campo di background, corretto da una combinazione lineare della differenza tra il campo di background stesso ed i record osservati dalle stazioni. Il coefficiente della combinazione lineare è ricavato dalla minimizzazione della varianza dell’errore dell’analisi. Quest’approccio rende possibile pesare il contributo in ciascun punto della griglia dei dati di osservazione più vicini mentre l’utilizzo di un campo di background esterno consente di ottenere l’omogeneità e la coerenza spaziale e temporale.

Il dataset si basa sui dati osservati di precipitazione e temperatura derivanti da due diverse reti di monitoraggio, la rete del SIMN (disponibile dal 1913 al 2002) e quella di telemisura di ARPA Piemonte, attiva dal 1988. Le stazioni presenti sul territorio sono aumentate nel corso dei decenni, dalle circa 25 presenti negli anni ‘50 si è passati alle 386 del 2009, soprattutto grazie all’introduzione delle stazioni di telemisura a partire dagli anni ‘90.

La risoluzione spaziale utilizzata è pari a 0.125° , ossia circa 15 km ed il grigliato è composto da 480 (20x24) settori, di cui 204 all’interno delle Regione Piemonte e 28 nella Valle d’Aosta. Per questo motivo insieme al dataset sono forniti altri due file, uno contenente l’orografia, ossia i valori di quota, latitudine e longitudine per ogni punto della griglia e l’altro (Maschera) contenente per ciascun punto della griglia il valore 1 nel caso il punto ricade all’interno della

regione Piemonte, altrimenti il valore 0.

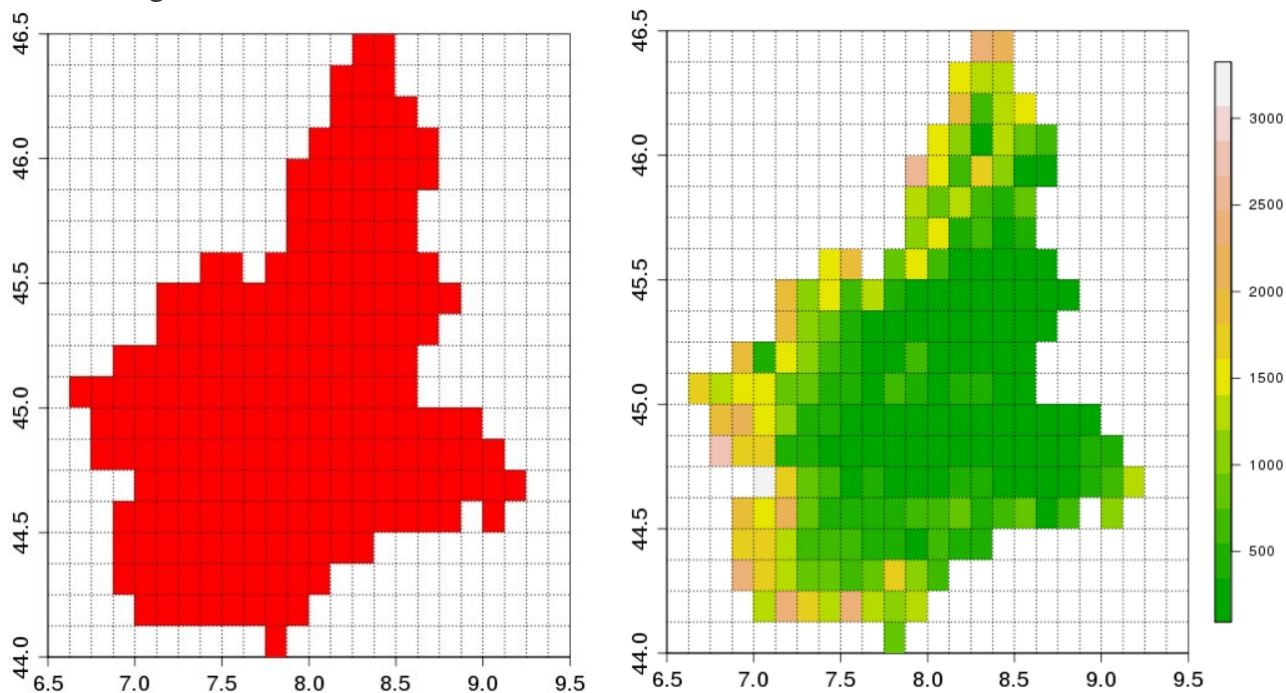


Figure 2-2. Rappresentazione su griglia dei file Maschera ed Orografia contenuti nel dataset NWIOI.

E' importante utilizzare per le elaborazioni soltanto i punti all'interno del dominio perché, non essendo nella disponibilità di Arpa Piemonte i dati relative alle stazioni di misura al di fuori della Regione Piemonte, le informazioni contenute all'esterno del dominio risultano non affidabili in quanto soltanto un prodotto dell'interpolazione non supportata da misure reali.

2.3 Implementazione del modello SWAT

Il modello SWAT è stato implementato grazie all'utilizzo dell'interfaccia ArcSWAT, un'estensione di ArcGis ed ArcMap. La versione utilizzata è ArcSWAT 2012.10.21 (1 Oct 2018) per ArcGis 10.4.

L'interfaccia aggiunge alla barra degli strumenti di ArcMap una toolbar dalla quale è possibile accedere ai vari menù ed alle varie finestre; i menù disponibili sono: "Watershed Delineator", "HRU Analysis", "Write Input Tables", "Edit SWAT Input" e "SWAT Simulation".

Nella figura sottostante è rappresentato un diagramma di flusso rappresentante le operazioni da compiere per impostare e lanciare un progetto in ArcSWAT. I box verdi rappresentano i dati di input da inserire mentre i grigi rappresentano i tools ed i processi di SWAT. Questi, nelle varie fasi di esecuzione del modello,

producono degli output, i box arancioni. I rettangoli viola, invece, rappresentano processi iterativi nei quali è possibile modificare le variabili di input fino a giungere a dei risultati accettabili.

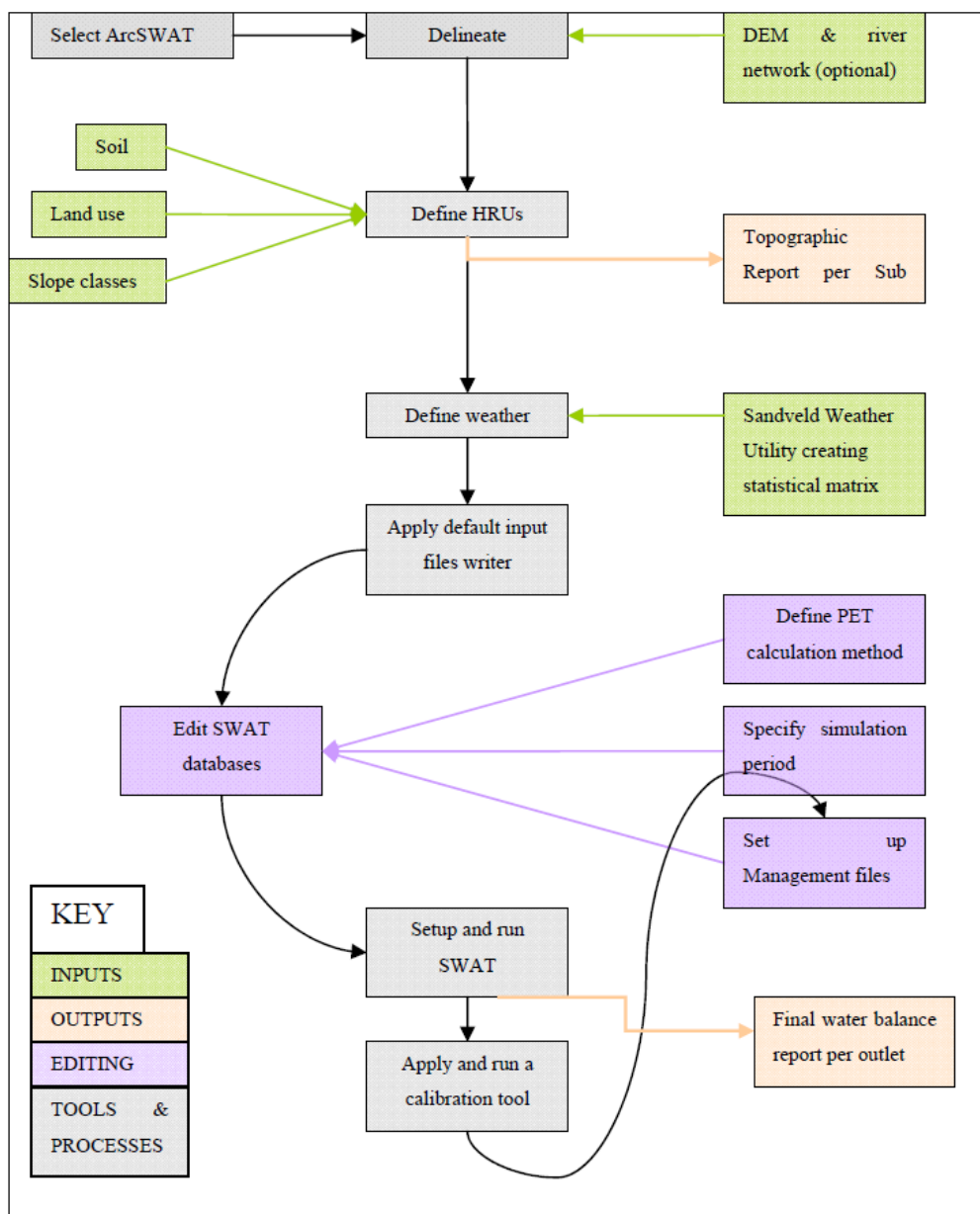


Figura 2-3. Diagramma di flusso dell'operazioni da compiere per creare un modello in ArcSWAT.

2.3.1 Delineazione del bacino idrografico

Il primo passo da compiere per implementare il modello su ArcSWAT è quello di delineare il bacino. Dalla finestra “Watershed Delineation” si procede, quindi, a caricare il DEM (V. Paragrafo 2.2.1) ed a definire l'unità di misura verticale, il metro. Il sistema di proiezione utilizzato è il WGS84 / UTM zone 32N,

sistema nel quale devono essere proiettati anche tutti gli altri dati georeferiti.

Una volta definite le proprietà del DEM, si inserisce una Mask, in modo tale che solo la porzione del DEM coperta dalla Mask sia processata dall'interfaccia, così da ridurre i tempi di calcolo che in questa fase sono abbastanza elevati.

Subito dopo si effettua l'operazione di Burn In, ossia si va ad inserire la rete idrografica in modo tale da migliorare la successiva procedura automatica di individuazione della rete fluviale e di delineazione del bacino e dei sottobacini.

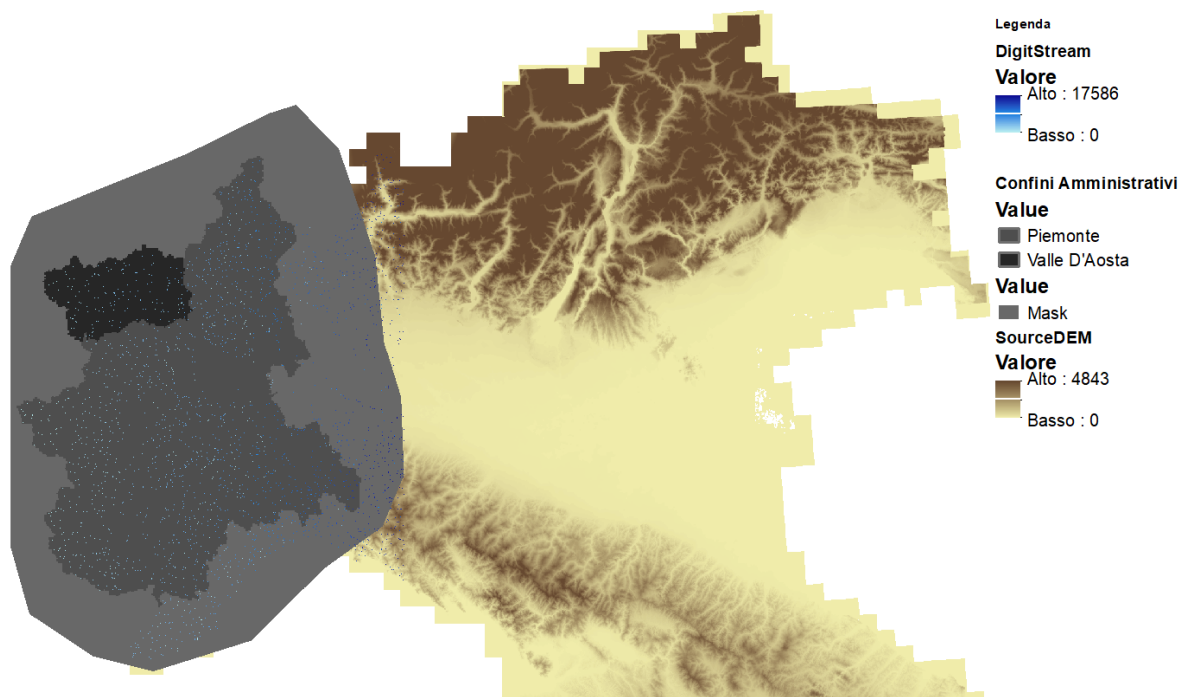


Figura 2-4. Delineazione Mask e Burn-in del reticolo idrografico.

Il passo successivo è quello di definizione della rete fluviale. ArcSWAT analizza il DEM ed indica una soglia inferiore ed una superiore, espresse in ettari, della superficie minima di drenaggio richiesta per originare un corso d'acqua. L'utente può scegliere un qualsiasi valore all'interno del dominio indicato; questa scelta è molto importante perché praticamente determina la superficie minima dei sottobacini dalla quale dipende il livello di dettaglio della rete fluviale ed il numero dei sottobacini stesso.

Nel caso oggetto di studio si è fissato un'area pari a 20.000 Ha a fronte di una soglia minima indicata pari a 18.000 Ha in modo da ottenere il massimo livello di dettaglio consentito, vista la grandezza dell'area processata.

Si ottiene così la rete fluviale sulla quale vanno successivamente aggiunti i punti di Outlet, come illustrato nella figura successiva. I punti in rosso sono

degli Outlet aggiunti a mano e rappresentano le sezioni di chiusura dell'intero bacino studiato mentre quelli bianchi sono stati aggiunti tramite una tabella e rappresentano le sezioni di chiusura dei sottobacini nei quali sarà effettuato il confronto tra le portate calcolate dal modello e quelle misurate nelle stazioni di misura.

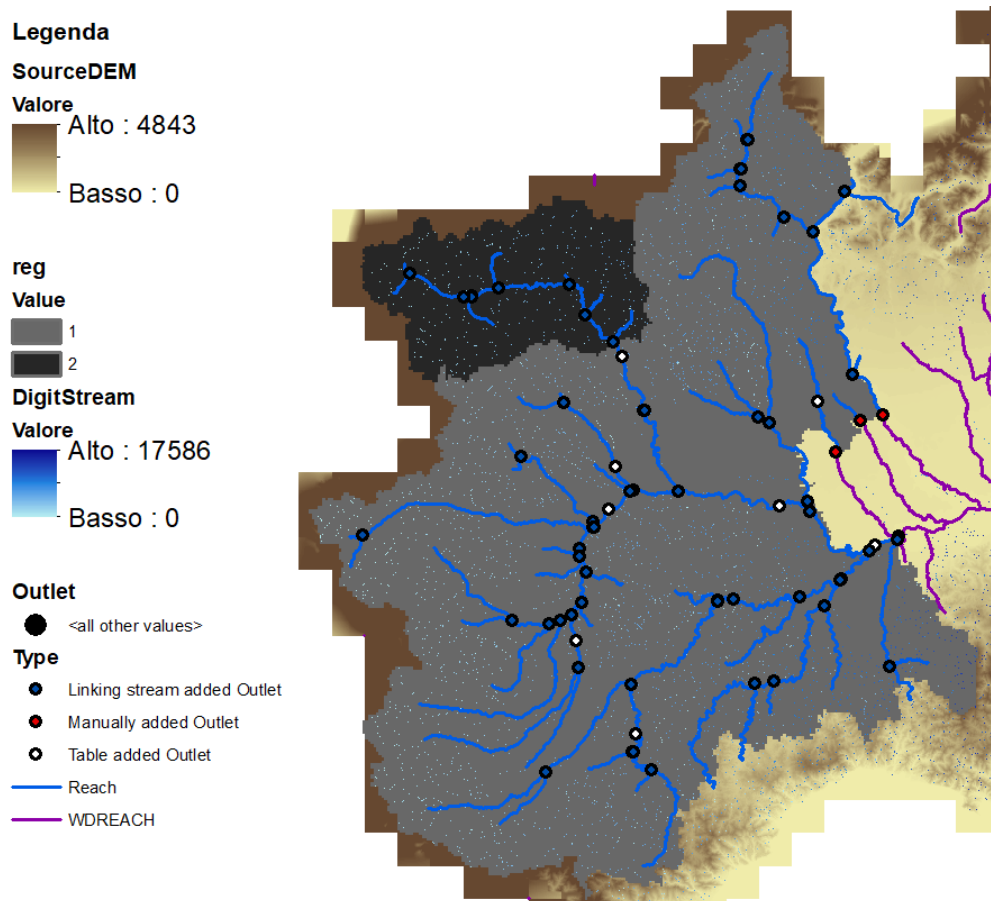


Figura 2-5. Rappresentazione della rete fluviale individuata da ArcSWAT e dei punti di Outlet.

Selezionati i punti di Outlet, è possibile lanciare l'ultimo processo relativo a questa sezione nella quale il programma individua i vari sottobacini e calcola i relativi parametri come quelli geomorfologici, i relativi tronchi fluviali ed i Longest Flow Path. Al termine di questa fase viene prodotto il primo report, ossia il Topographic Report e viene sbloccata la finestra all'interno del menù "HRU Analysis" per passare al passo successivo, descritto nel prossimo paragrafo, di creazione delle HRU.

Nel caso oggetto di studio, in particolare, sono stati individuati 113 sottobacini, il più piccolo di 0.65 km² ed il più grande di 1205 km², per un totale di 31800 km². In termini di elevazione, invece, il punto più basso si trova a 61 m s.l.m.

mentre quello più alto a 4809 m s.l.m. con un'altezza media di 944 m s.l.m.

Nell'immagine seguente è rappresentata la discretizzazione dell'intera area di studio nei vari sottobacini.

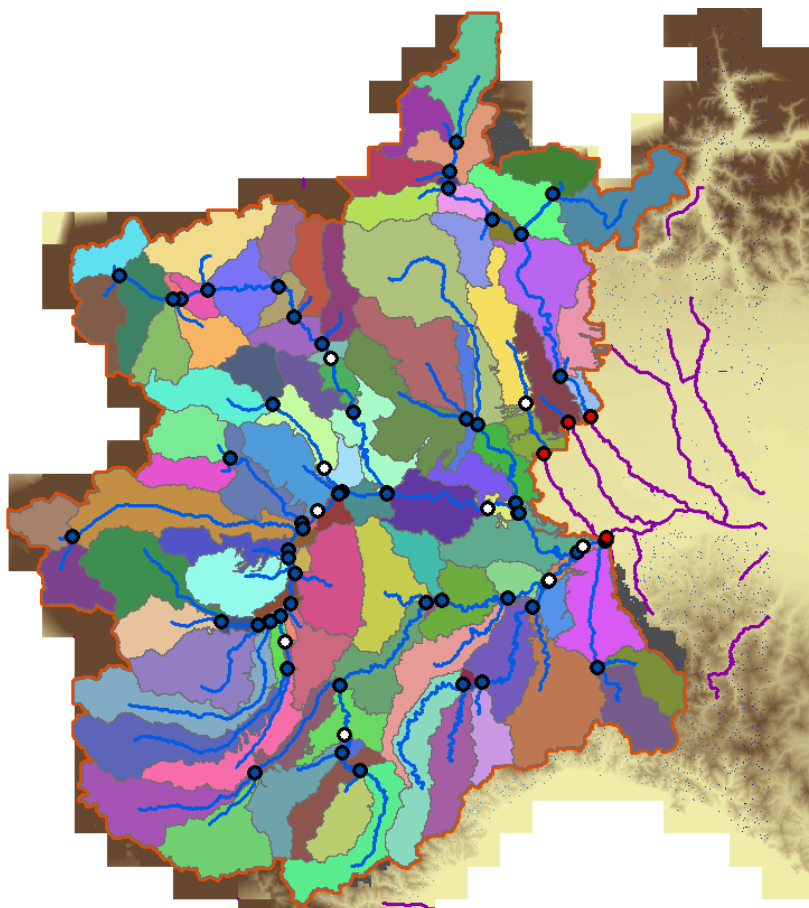


Figura 2-6. Sottobacini individuati dalla procedura automatica di ArcSWAT.

2.3.2 Definizione delle HRU

Il passaggio successivo è quello della definizione delle HRU. Dal menù “HRU Analysis”, per prima cosa si apre la finestra “Land Use / Soil / Slope Definition and Overlay” e si vanno ad inserire all'interno del progetto i dataset di suolo ed uso del suolo, descritti nei paragrafi precedenti (V. Par 2.2.2 e 2.2.3). Una volta inseriti questi due database, si vanno a valutare le caratteristiche del bacino in termini di pendenza ed a determinarne le classi. Fatto questo, ArcSWAT esegue il processo di Overlay, nel quale va a determinare per ogni sottobacino le combinazioni delle classi di uso del suolo, caratteristiche del suolo e pendenza, incrociando i dati tra loro.

Nell'immagine sottostante è riportata la distribuzione delle classi di uso del suolo all'interno del bacino. ArcSWAT, una volta caricato il database CLC, va in automatico a ritagliarsi la porzione che interessa l'area di studio; in seguito bisogna associare tramite una tabella le classi del Corine a quelle presenti in SWAT.

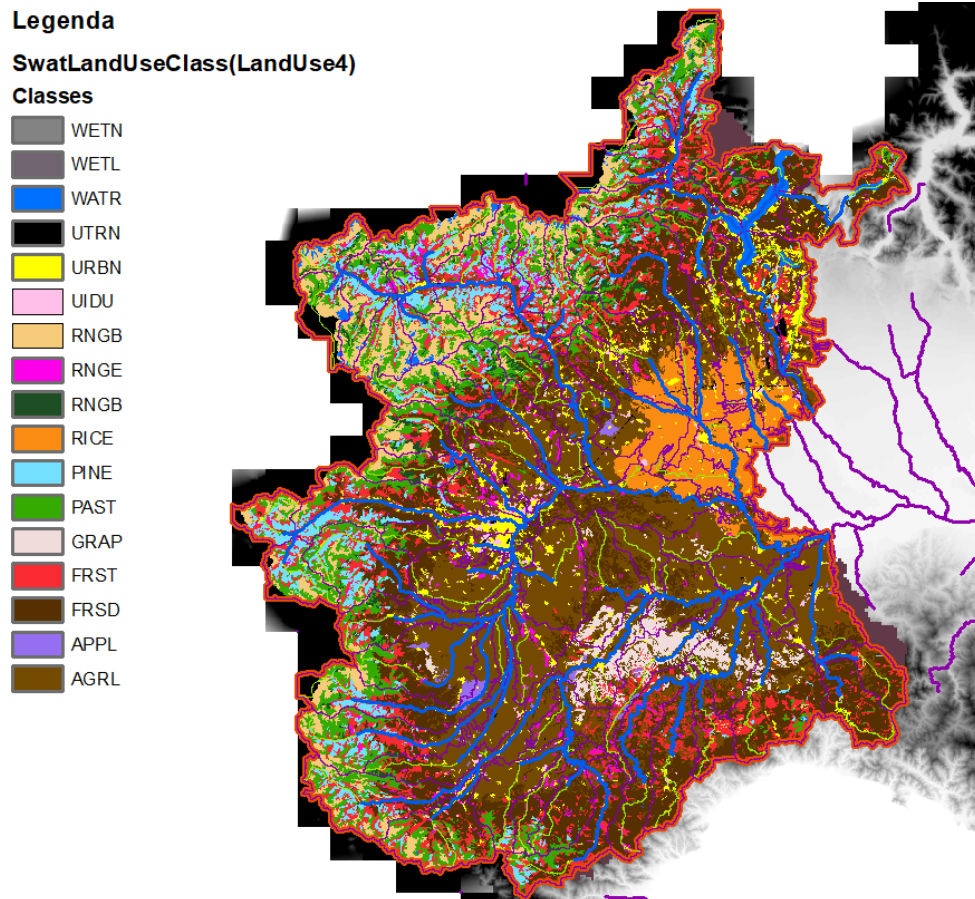


Figura 2-7. Rappresentazione delle classi di uso del suolo.

In maniera del tutto simile si inserisce il database dei suoli, ossia la mappa del SGDBE descritta al paragrafo 2.2.3. L'unica differenza è che in questo caso, prima di questa operazione, bisogna andare a caricare nel database di SWAT i suoli dell'ESDB e le relative caratteristiche, tramite il menu "Edit SWAT Input". La rappresentazione dei suoli all'interno del bacino è rappresentata nell'immagine seguente. In legenda compaiono le sigle dei vari suoli individuati, le stesse utilizzate dall'ESDB (European Soil Database).

A questo punto si vanno ad inserire le classi di pendenza, nel caso oggetto di studio si sono individuate 4 classi (0-1%, 1-5%, 5-10% e >10%), e si fa partire il processo di Overlay nella quale, come detto precedentemente, ArcSWAT

incrocia le informazioni e le combina tra di loro. Alla fine di questo procedimento, il programma produce il secondo report, ossia il “LANDUSE/SOIL/SLOPE Distribution” nel quale vengono elencati tutte le classi di uso del suolo, suolo e pendenza presenti all’interno di ciascun sottobacino.

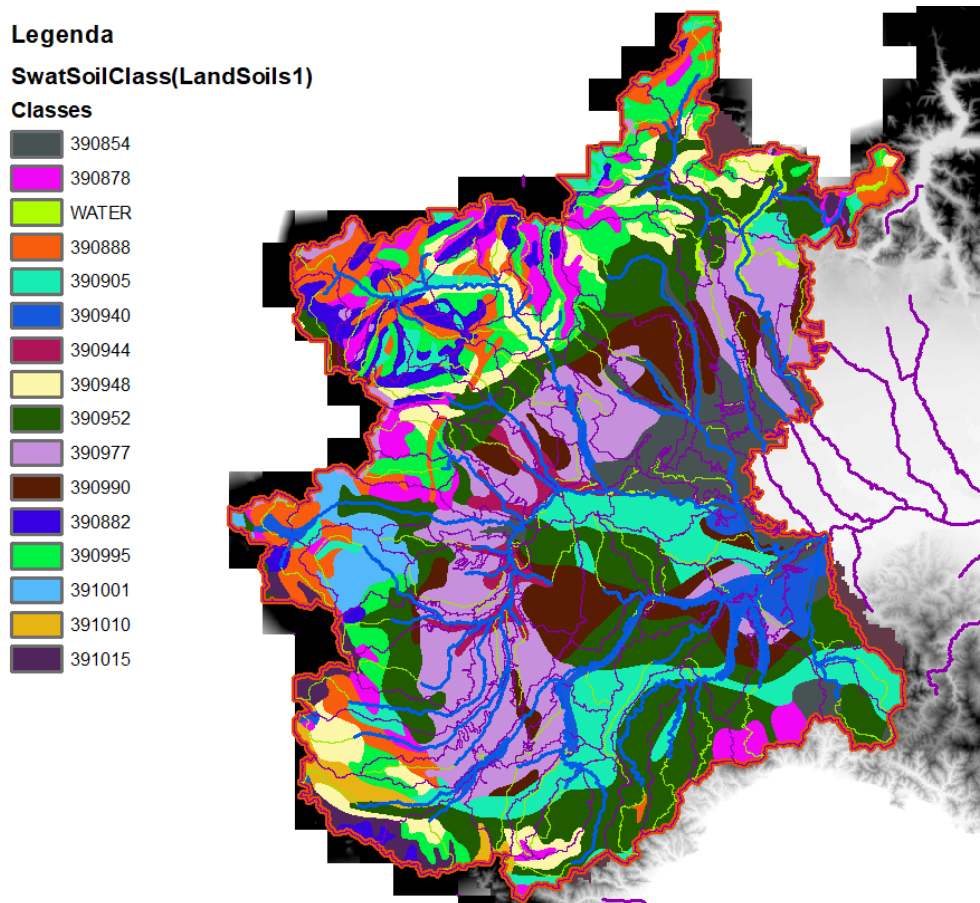


Figura 2-8. Rappresentazione delle classi di suolo.

Inserite queste informazioni ed incrociate tra di loro, è possibile andare a definire all’interno di ciascun sottobacino le HRU, ossia le unità di risposta idrologica, dalla finestra “HRU Definition”. Ogni HRU, è caratterizzata da parametri idrologici differenti, a secondo delle categorie di suolo/uso del suolo da cui è composta. Il deflusso è calcolato separatamente per ciascuna HRU e poi sommato per ottenere quello totale in uscita dal sottobacino in modo da migliorare l’accuratezza del modello.

Ci sono due metodi per la creazione delle HRU. Il primo “Dominant Land Use, Soils, Slope” prevede la creazione di un’unica HRU per ciascun sottobacino definita in base alle classi di uso del suolo/soilo/pendenza dominanti. Il secondo

“Multiple HRUs” prevede invece la creazione di più HRU per ciascun sottobacino. In particolare, si stabilisce una soglia in ettari; gli usi del suolo ed i suoli aventi un’area maggiore della soglia rientrano nella creazione delle HRU mentre quegli aventi un’area minore vengono eliminati e l’area da loro occupata viene ridistribuita tra le altre classi.

Nel caso oggetto di studio si è utilizzato il secondo criterio, in modo da analizzare gli effetti di differenti combinazioni di tipo ed uso del suolo ed avere un modello più simile alla realtà. Nello specifico, la soglia impostata è pari a 5.000 ha, sia per gli usi del suolo che per i tipi di suolo e le classi di pendenza. Così facendo, all’interno dei 113 sottobacini di cui è composta l’area di studio, sono state individuate 264 HRU, come riportato nel terzo report prodotto dal programma (Final HRU Distribution).

2.3.3 Processing dei dati climatici e del database di default

In questa fase vanno inseriti i dati climatici; nel caso oggetto di studio, poiché si è scelto di utilizzare il metodo di Hargreaves per il calcolo dell’evapotraspirazione, sono precipitazioni cumulate giornaliere, temperature massime e minime giornaliere.

Sono stati preparati dei file di testo, secondo il formato richiesto da ArcSWAT, contenenti le informazioni meteorologiche per ciascun punto griglia del database NWIOI (V. Paragrafo 2.2.4) e sono stati caricati in ArcSWAT dalla finestra “Weather Stations” all’interno del menu “Write Input Tables”.

SWAT va quindi ad assegnare a ciascun sottobacino i dati del punto griglia più prossimo al baricentro del sottobacino stesso. Questo è un limite del modello poiché, pur avendo un database con una risoluzione di 0.125° tale che all’interno del bacino ricadono 232 punti di input meteorologici, solo 101 vengono assegnati ad i sottobacini di cui è composta l’area di studio (Rappresentati dai punti in blu di Figura 2-9).

Una volta date le stazioni climatiche, ArcSWAT è in grado di scrivere tutti i dati di Input e si vanno ad assegnare i parametri generali del modello. E’ possibile impostare, per esempio, il metodo per il calcolo della PET (Hargreaves), il metodo per il calcolo del deflusso (Metodo del SCS Curve

Number), il metodo di routing (Variable Storage), la temperatura di scioglimento della neve (5°C) e tanti altri parametri che, settati su dei dati di default, possono esser modificati in base alle caratteristiche del bacino.

Legenda

-  Basin
-  Reach

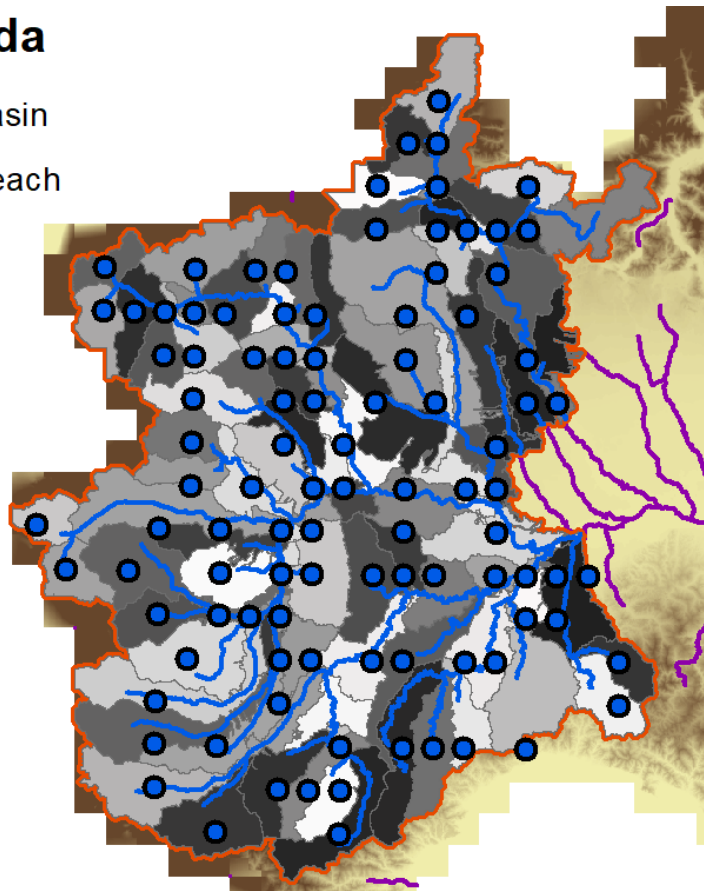


Figura 2-9. Punti del grigliato NWIOI assegnati ai vari sottobacini.

2.3.4 Simulazione

A questo punto, è possibile finalmente far partire la simulazione. Dal menu “SWAT Simulation” si apre la finestra “Setup and Run SWAT Model Simulation” e si vanno ad impostare le date di inizio e fine simulazione nonché la scala temporale. Nel caso oggetto di studio l’intervallo simulato, a scala giornaliera, è 01/01/1958-31/12/2017 ed inoltre si è impostato il parametro NYSKP, ossia il numero di anni di warm-up, su 3.

3 I RISULTATI DEL MODELLO SWAT

3.1 I report di ArcSWAT

Come detto nel capitolo precedente, ArcSWAT produce vari report man mano che si procede con la modellazione del bacino idrografico. Nelle pagine seguenti sono riportate, sinteticamente, solo le informazioni più importanti ricavabili dai vari report.

3.1.1 Report topografico

Il report topografico produce le informazioni in termini di elevazione massima, minima e media per l'intero bacino ed i relativi sottobacini, nonché fornisce per ogni valore di elevazione la percentuale di bacino avente quella quota e la percentuale di area sottostante quella quota. Qui si riportano sinteticamente solo i valori di elevazione massima, minima e media dell'intero bacino nonché un grafico che mostra la distribuzione delle quote in termini percentuali.

Statistics: All elevations reported in meters

Min. Elevation: 61
Max. Elevation: 4809
Mean. Elevation: 944.367291474102
Std. Deviation: 862.72284593486

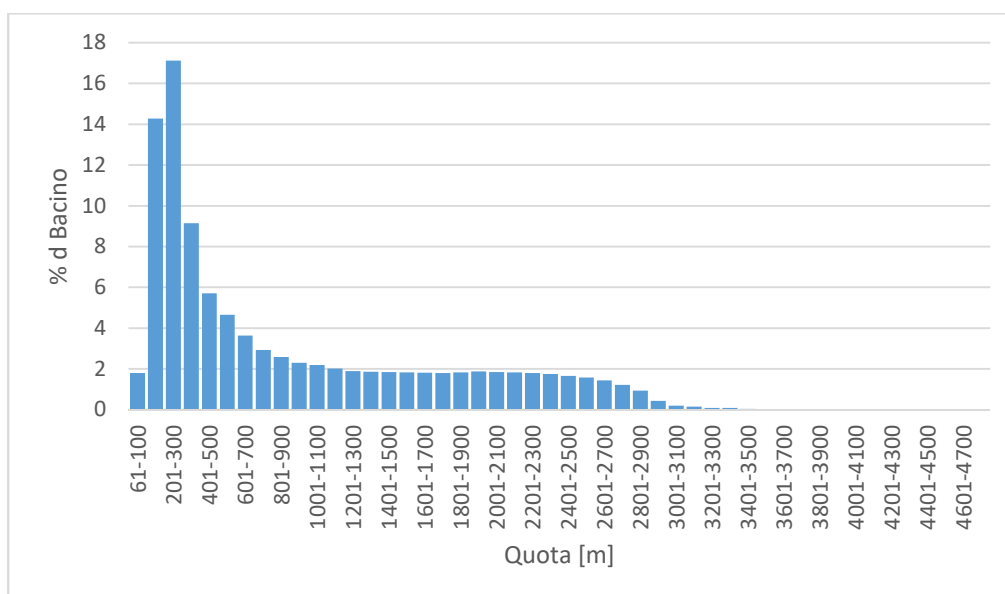


Figura 3-1. Distribuzione delle quote sul bacino idrografico modellato.

3.1.2 HRU Analysis Report

In questo report sono elencate tutte le HRU individuate all'interno del bacino, i tipi suolo, uso del suolo e classe di pendenza che le caratterizzano, e la loro superficie, espressa in ettari. Qui di seguito si riportano soltanto le informazioni relative alle varie classi individuate all'interno dell'intero bacino.

MULTIPLE HRUs LandUse/Soil/Slope OPTION

THRESHOLDS : 5000 / 5000 / 5000 [ha]

Number of HRUs: 264

Number of Subbasins: 113

	Area [ha]	Area[acres]	
Watershed	3180181.9600	7858388.6323	
	Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area
LANDUSE:			
Forest-Mixed --> FRST	310503.0902	767268.6609	9.76
Pine --> PINE	125415.9933	309909.1902	3.94
Pasture --> PAST	265428.1461	655886.2205	8.35
Range-Brush --> RNGB	325775.994	805008.9683	10.24
Forest-Deciduous --> FRSD	786553.5768	1943613.2158	24.73
Water --> WATR	23945.1734	59169.7208	0.75
Residential --> URBN	35001.9424	86491.5497	1.10
Agricultural Land-Gen. --> AGRL	1060404.5704	2620312.7137	33.34
Rice --> RICE	188684.6315	466249.1587	5.93
Vineyard --> GRAP	58468.7737	144479.2633	1.84
SOILS:			
390995	208655.8540	515599.0481	6.56
390888	167191.1264	413137.6329	5.26
390948	152220.5413	376144.5685	4.79
390952	808134.2862	1996940.2278	25.41
390878	145015.7271	358341.1124	4.56
WATER	23945.1734	59169.7208	0.75
390977	599825.7767	1482199.4854	18.86
390882	142302.1915	351635.8303	4.47
390854	201677.2578	498354.5880	6.34
390990	204173.2679	504522.3537	6.42
390944	21637.7619	53467.9916	0.68

390905	235649.9680	582302.8535	7.41
391001	91498.1721	226096.5582	2.88
391015	54185.1716	133894.2683	1.70
390940	77160.5783	190667.6470	2.43
391010	46909.1057	115914.7457	1.48

SLOPE:

10-9999	2160237.4369	5338054.7185	67.93
0-1.1	757202.5477	1871085.3554	23.81
1-5	262741.9754	649248.5584	8.26

3.1.3 Master watershed file

All'interno di questo report ci sono le informazioni generali sugli Input/Output, come il numero di anni simulato, l'anno di partenza, il tipo di dato climatico usato, espresso da un codice (1 nel caso di dati misurati, 2 nel caso di dati simulati dal Weather Generator di SWAT) ed il numero di stazioni meteo utilizzata (NRGAGE).

General Input/Output section (file.cio):

General Information/Watershed Configuration:

fig.fig

60 | NBYR : Number of years simulated
1958 | IYR : Beginning year of simulation
1 | IDAF : Beginning julian day of simulation
365 | IDAL : Ending julian day of simulation
3 | NYSKIP: number of years to skip output printing/summarization

Climate:

0 | IGEN : Random number seed cycle code
1 | PCPSIM : precipitation simulation code: 1=measured, 2=simulated
0 | IDT : Rainfall data time step
0 | IDIST : rainfall distribution code: 0 skewed, 1 exponential
1.300 | REXP : Exponent for IDIST=1
1 | NRGAGE: number of pcp files used in simulation
101 | NRTOT: number of precip gage records used in simulation
101 | NRGFIL: number of gage records in each pcp file
1 | TMPSIM: temperature simulation code: 1=measured, 2=simulated
1 | NTGAGE: number of tmp files used in simulation
101 | NTTOT: number of temp gage records used in simulation
101 | NTGFIL: number of gage records in each tmp file

3.2 I deflussi nelle sezioni di confronto

Per valutare la bontà del modello si sono confrontati i dati delle portate calcolate dal modello in diversi punti con quelli rilevati dalle corrispondenti stazioni idrometriche, disponibili sul sito di ARPA Piemonte. Le caratteristiche delle stazioni considerate e dei rispettivi bacini sono riportate nella tabella sottostante. Come si può notare, l'intervallo delle serie di misure coperto dalle varie stazioni varia; le serie del Po a Torino e del Tanaro a Montecastello partono dal 1995 mentre l'intervallo coperto da tutte le serie è quello 2003/2017, ad eccezione del Po a Castiglione Torinese che ha trasmesso fino alla fine del 2016 e del Po a Casale Monferrato che, invece, parte dal 2009. Quindi si è scelto di considerare come intervallo di calibrazione il periodo di 10 anni 2002/2011, mentre per la validazione si è utilizzato il periodo 2013/2017, di 5 anni.

	Codice	UTM_X_ WGS84 (m)	UTM_Y_ WGS84 (m)	Quota sito	Area Bacino	Quota media	Inizio Serie	Fine Serie
Po Torino Murazzi	POTO	397498	4990962	239	5355	914	1/1/95	31/12/17
Po Castiglione Torinese	POCT	404427	4998162	215	7685	1083	1/1/03	31/12/16
Po Casale Monferrato	POCM	456574	4998853	115	13732	1257	1/1/09	Attiva
Po Isola Sant'Antonio	POIS	485974	4986982	76	25640	959	1/1/96	Attiva
Maira Racconigi	MAIRC	394537	4957993	259	1326	976	1/1/02	Attiva
Orco San Benigno	ORCSB	406312	5011060	219	838	1567	1/1/02	Attiva
Soana Pont Canavese	SOAPO	390595	5030737	453	215	1898	1/1/02	Attiva
Tanaro Farigliano	TANFA	412708	4929896	263	1502	945	1/1/03	Attiva
Tanaro Montecastello	TANMO	475103	4977075	86	7956	657	13/04/95	Attiva
Cervo Quinto Verellese	CEVQU	451011	5025503	160	1002	504	1/1/03	Attiva
Agogna Novara	AGONO	467980	5030915	146	382	332	1/1/02	Attiva
Dora Baltea Tavagnasco	DBATA	408420	5044505	270	3321	2087	1/1/02	Attiva
Stura di Lanzo Torino	SLATO	398252	4996118	221	880	1368	1/1/02	Attiva
Dora Riparia Torino	DRITO	399093	4992176	219	1322	1365	1/1/02	Attiva
Dora Riparia Oulx	DRIOU	329336	4988967	1105	260	2164	1/1/01	Attiva

Tabella 3-1. Caratteristiche delle stazioni di misura utilizzate per la validazione del modello

Dalla figura sottostante, si può notare come, da un punto di vista della distribuzione spaziale, le stazioni scelte risultano ben distribuite sull'intera area del bacino, seppur si nota una maggior concentrazione in corrispondenza della città di Torino, dove si sono considerate le stazioni in corrispondenza della

confluenza della Dora Riparia e della Stura di Lanzo nel Po, oltre che il Po stesso ai Murazzi.

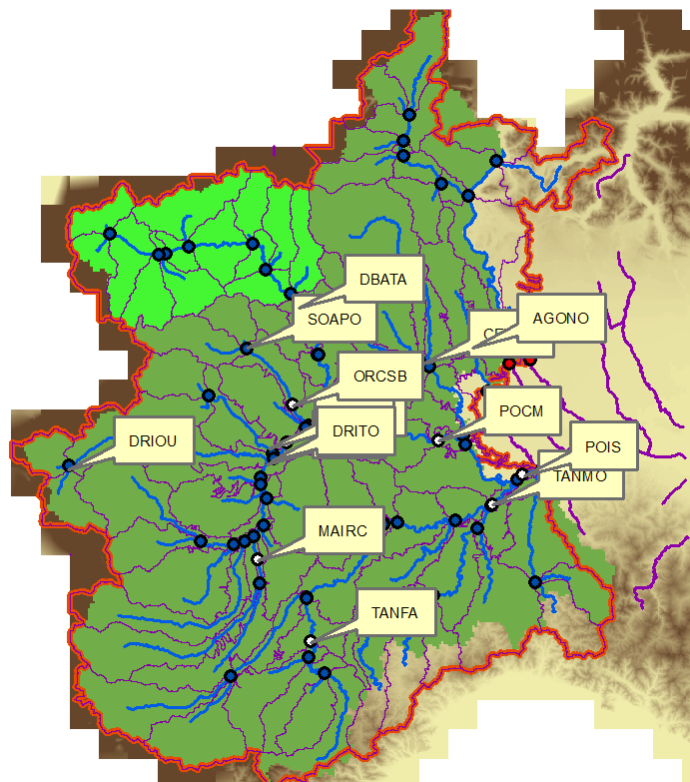


Figura 3-2. Inquadramento geografico delle stazioni di misura.

Le stazioni risultano coprire un range abbastanza ampio anche in termini di quota media ed area del bacino, come si può osservare dal grafico sottostante. In modo tale è possibile stimare l'affidabilità del modello al variare delle caratteristiche del bacino considerato.

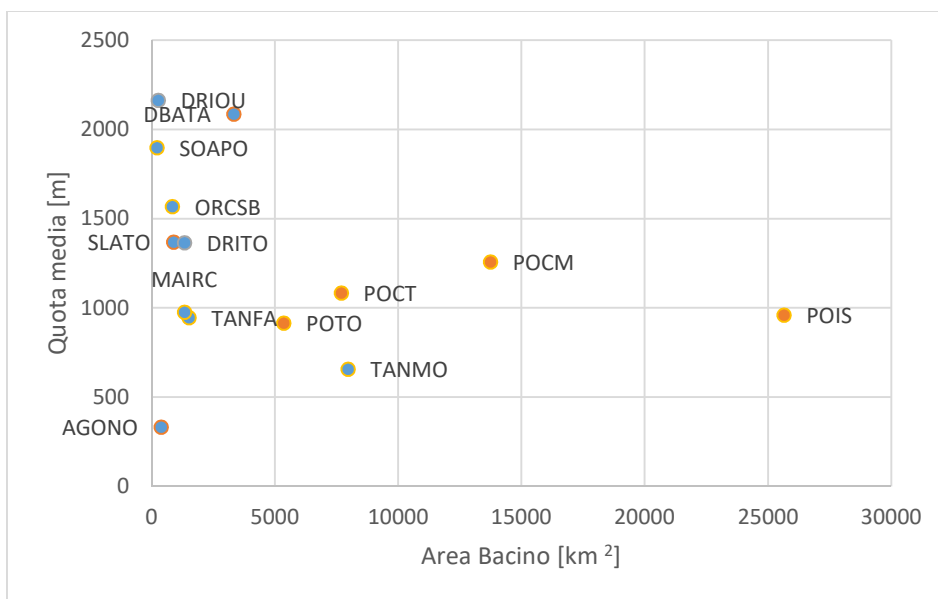


Figura 3-3. Caratteristiche topografiche dei bacini a monte delle stazioni di misura.

3.2.1 Le funzioni obiettivo utilizzate

In questo paragrafo vengono elencate le funzioni obiettivo utilizzate prima per valutare le prestazioni del modello e successivamente per la calibrazione, che consiste, appunto, nel massimizzare (o minimizzare) una funzione obiettivo, andando a variare un set di parametri ritenuti sensibili e che sarà trattata più specificamente nel prossimo capitolo.

I parametri scelti sono:

- Nash-Sutcliffe Measure
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oss_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oss_i} - \overline{Q_{oss}})^2}$$
- Route Mean Square Error
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Q_{oss_i} - Q_{sim_i})^2}$$
- Mean Absolute Error
$$MAE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n |Q_{oss_i} - Q_{sim_i}|$$
- PBIAS
$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oss_i} - Q_{sim_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{oss_i}}$$
- RSR
$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oss_i} - Q_{sim_i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oss_i} - \overline{Q_{oss}})^2}}$$
- Mean Relative Error
$$MRE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{oss_i} - Q_{sim_i}}{Q_{oss_i}} \right|$$

L'indice di Nash-Sutcliffe (NS) è una valutazione del rapporto tra l'errore del modello e la variabilità dei dati misurati dalla stazione di misura. Varia tra $-\infty$ ed 1, che è il valore ottimale. Valori positivi sono generalmente ritenuti accettabili mentre valori negativi indicano che il valore medio osservato è un indicatore migliore del valore simulato, il che non è accettabile.

IL Percentage Model BIAS (PBIAS) misura la tendenza media del dato simulato ad essere minore o maggiore di quello osservato. Il valore ottimale è 0, valori negativi indicano una sottostima del modello mentre quelli positivi una sovrastima.

L'RSR (RMSE-observations standard deviation ratio) è pari al RMSE normalizzato usando la deviazione standard delle osservazioni. Il valore ottimale è 0; più è basso e più le performance del modello sono ottimali.

Secondo Moriasi et al. (2007), affinché un modello a scala mensile si possa dire soddisfacente deve risultare un RSR < 0.70, un NS >0.50 ed un PBIAS < ±25. Naturalmente, però, in questo tipo di considerazioni bisogna tener conto della scala spaziale e temporale del modello, nonché della qualità dei dati inseriti.

Altri strumenti utili per valutare la bontà del modello sono quelli grafici come i grafici scatterplot Portate Misurate-Portate Simulate ed il confronto tra l'idrogramma delle portate misurate e quello delle portate simulate, su base annua. Questi grafici vengono riportati in appendice.

3.2.2 Risultati del modello predefinito

Nel seguito vengono elencati i risultati ottenuti dal modello SWAT originale, antecedente la calibrazione, per i vari sottobacini di confronto di Tabella 3-1.

Come detto precedentemente, sono stati considerati due intervalli temporali; il primo 2002-2011 di dieci anni, utilizzato per la calibrazione ed il secondo 2013/2017, utilizzato per la validazione. Di conseguenza, le tabelle sottostanti riportano i risultati ottenuti dal modello in termini dei parametri di valutazione elencati al paragrafo precedente relativi ai due differenti periodi considerati.

2002/2011								
Codice	Area Bacino	Quota media	NS	RMSE	MAE	PBIAS	RSR	MRE
POTO	5355	914	0.38	68.89	27.49	-3.75	0.78	0.43
POCT	7685	1083	0.60	87.08	62.48	5.87	0.63	0.36
POCM	13732	1257	0.36	205.61	96.25	-26.28	0.80	0.67
POIS	25640	959	0.55	353.63	158.09	8.91	0.67	0.39
MAIRC	1326	976	-0.35	15.83	8.28	-38.22	1.16	15.24
ORCSB	838	1567	0.64	19.28	8.50	9.72	0.60	14.74
SOAPO	215	1898	0.42	6.69	3.06	19.00	0.76	0.49
TANFA	1502	945	0.59	36.87	14.72	23.91	0.64	0.42
TANMO	7956	657	0.55	127.65	46.62	-2.80	0.67	0.48
CEVQU	1002	504	0.44	25.80	15.73	28.42	0.75	0.59
AGONO	382	332	0.42	7.09	3.83	-3.60	0.76	1.88
DBATA	3321	2087	0.28	65.13	45.53	45.74	0.85	0.48
SLATO	880	1368	0.66	21.73	10.21	13.94	0.58	3.11
DRITO	1322	1365	0.51	13.34	8.46	21.86	0.70	0.42
DRIOU	260	2164	0.30	4.17	2.65	49.64	0.84	0.67

Tabella 3-2. Statistiche di errore intervallo 2002/11.

2013/2017								
Codice	Area Bacino	Quota media	NS	RMSE	MAE	PBIAS	RSR	MRE
POTO	5355	914	0.03	86.45	27.42	3.31	0.99	0.38
POCT	7685	1083	0.25	129.68	82.04	6.46	0.87	0.31
POCM	13732	1257	0.15	189.81	80.28	-17.12	0.92	0.57
POIS	25640	959	0.32	370.59	146.07	4.58	0.82	0.35
MAIRC	1326	976	0.06	13.19	7.14	-12.54	0.97	1.34
ORCSB	838	1567	0.68	17.39	8.23	9.37	0.57	0.74
SOAPO	215	1898	0.37	4.79	2.67	17.47	0.79	0.39
TANFA	1502	945	0.69	40.30	14.25	18.60	0.56	0.38
TANMO	7956	657	0.47	139.43	46.85	0.02	0.73	0.44
CEVQU	1002	504	0.56	28.39	13.55	17.06	0.66	0.54
AGONO	382	332	0.63	7.63	3.66	-6.23	0.61	0.54
DBATA	3321	2087	0.01	74.64	49.95	47.46	0.99	0.47
SLATO	880	1368	0.64	22.46	9.66	16.57	0.60	0.46
DRITO	1322	1365	0.12	18.17	9.52	20.40	0.94	0.41
DRIOU	260	2164	0.24	3.15	2.26	35.41	0.87	0.56

Tabella 3-3. Statistiche di errore intervallo 2013/17.

Analizzando le tabelle soprariportate è opportuno fare alcune considerazioni. Per prima cosa si può notare, osservando anche gli scatterplot riportati in appendice, come il modello, pur non essendo stato ancora calibrato, riesce ad essere abbastanza fedele alla realtà, sebbene con alcune eccezioni. Ciò soprattutto se si considera l'ampiezza dell'intervallo considerato e la grandezza del bacino modellato, al cui interno sono stati individuati 113 sottobacini, parametrizzati simultaneamente. Una simulazione più locale, ottenuta modellando il bacino in vari sottobacini e facendo girare SWAT per ognuno di essi separatamente, aumentando così la risoluzione, porterebbe sicuramente dei risultati migliori. Un altro fattore da tener presente quando si fanno dei confronti, è che il modello dipende fortemente dai dati di input inseriti.

Comunque le performance del modello in termini di PBIAS nell'intervallo 2013/2017 sono più che soddisfacenti. Il PBIAS, infatti, risulta in valore assoluto sempre minore di 25, eccetto per il bacino della Dora Baltea a Tavagnasco (DBATA) e della Dora Riparia ad Oulx (DRIOU), il che denota una scarsa adattabilità del modello ad i bacini montani, come sarà discusso nel seguito. Per il resto dei bacini considerati, secondo Moriasi et al. (2007), in termini di PBIAS la modellazione risultata sempre soddisfacente ($\pm 15 < \text{PBIAS} < \pm 25$) ed in molti casi buona ($\pm 10 < \text{PBIAS} < \pm 15$). Ciò lo si nota anche in Figura 3-3 dove è riportato l'andamento del PBIAS in funzione dell'altezza

media del bacino.

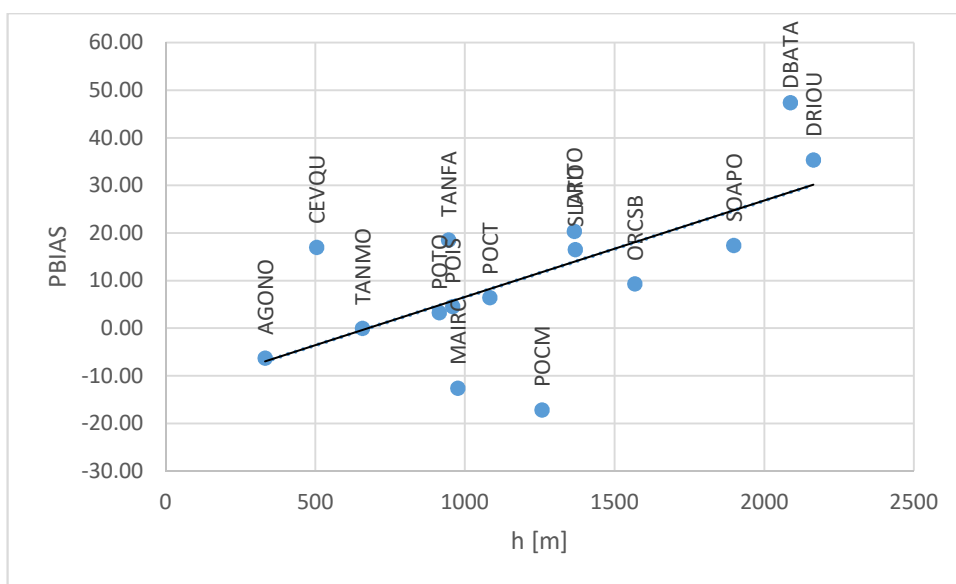


Figura 3-4. Andamento del PBIAS in funzione dell'altezza media del bacino.

Un'altra osservazione si può fare osservando i valori dell'indice di Nash che nel periodo 2002/11 (NS>0.5 nel 70% dei casi) risultano mediamente migliori dei corrispettivi nel 2013/17 (NS>0.5 nel 50% dei casi), come si può vedere dal grafico sotto riportato. Analoghe considerazioni si possono fare per l'RSR.

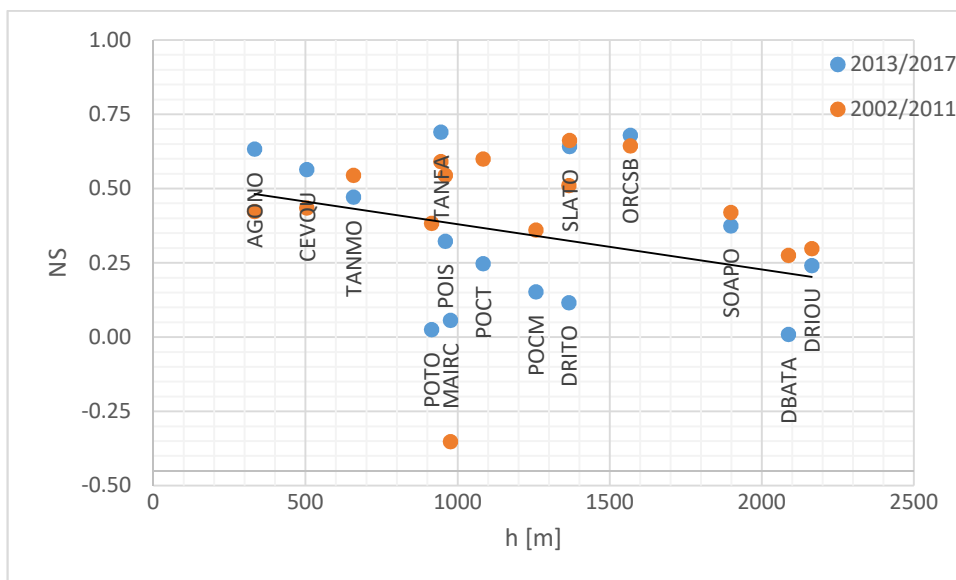


Figura 3-5. Andamento del NS in funzione dell'altezza media del bacino.

In particolare, analizzando fattori come l'indice di Nash (NS), la radice dell'errore quadratico medio normalizzato (RSR) e l'errore relativo medio (MRE) per il 2013/17 separato in due archi temporali (13/15 e 16/17), si nota un sostanziale peggioramento per l'ultimo biennio.

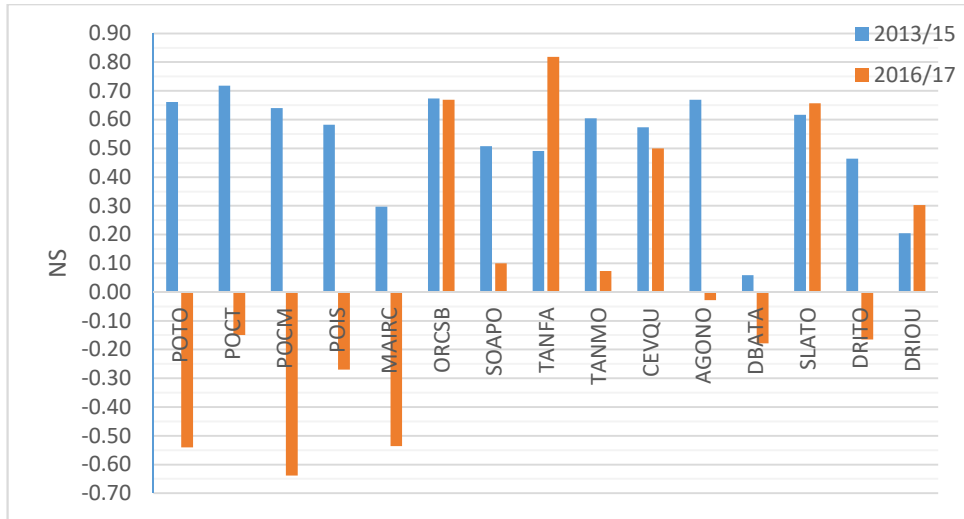


Figura 3-6. NS per il 2013/15 ed il 2016/17.

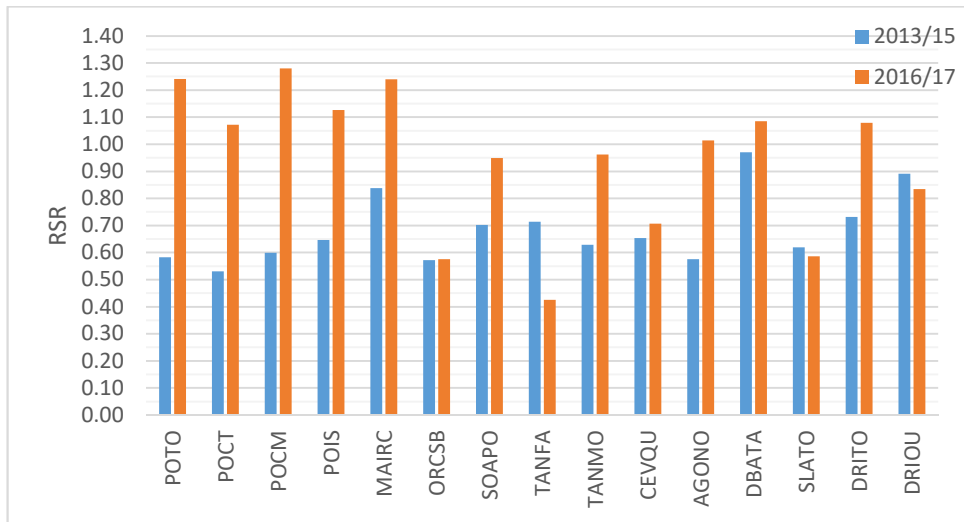


Figura 3-7 RSR per il 2013/15 ed il 2016/17.

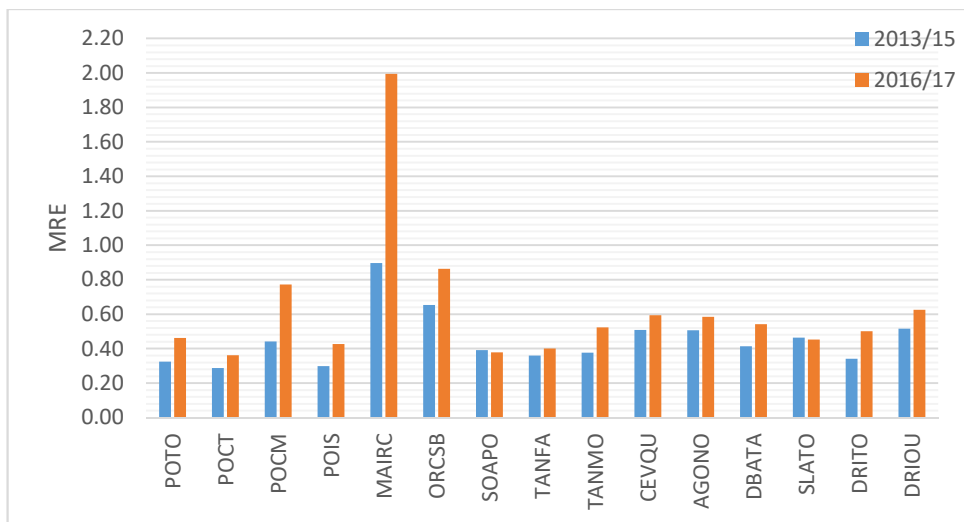


Figura 3-8. MRE per il 2013/15 ed il 2016/17.

Osservando gli idrogrammi si è notato che questo comportamento potrebbe essere dovuto ad un base-flow troppo basso che si nota bene in quelli relativi al 2017, un anno molto siccitoso, e soprattutto all'evento di piena eccezionale del novembre 2016 (V. Figure 3.10). La questione del base-flow, come si vedrà nel prossimo capitolo, è risolta in fase di calibrazione. Per quanto riguarda il picco di portata del 2016, il problema sembra sia dovuto non solo ad una sovrastima del picco modellato ma anche ad un piccolo ritardo temporale del picco stesso, che risulta leggermente shiftato verso sinistra rispetto a quello simulato. Questa situazione si è riscontrata anche nel database del grigliato delle piogge NWIOI di ARPA Piemonte, come sarà illustrato nel paragrafo successivo. A tal proposito, andando a traslare in avanti di un giorno la serie delle portate simulate, si osserva un netto miglioramento, per esempio, dell'indice di Nash-Sutcliffe, soprattutto per i bacini più estesi quali quelli del Po e del Tanaro a Montecastello.

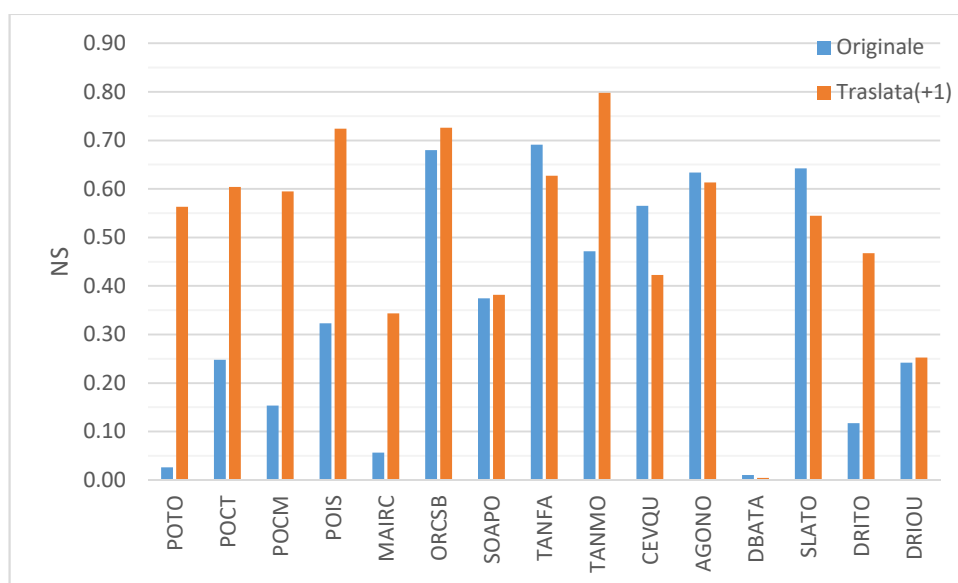


Figura 3-9. Indice di Nash-Sutcliffe per il periodo 2013/17.

Gran parte delle criticità notate precedentemente in fase di calibrazione vengono risolte ed il modello risulta soddisfacente ad eccezione dei bacini montani. Per questi ultimi, infatti, il modello sembra non essere adatto a simularne il comportamento. Le statistiche di errore dei bacini della Dora Baltea a Tavagnasco, della Dora Riparia ad Oulx, gli unici 2 sopra ai 2000m, sono infatti mediamente peggiori rispetto agli altri bacini. Ciò lo si può notare anche dalla tabella sottostante, dove sono riportate le portate medie per gli intervalli

considerati ed il rapporto tra la portata media osservata e quella simulata. Per i due bacini sopra ad i 2000 m, si nota come la portata media sia molto sottostimata dal modello. In particolare questo sembra sia dovuto ad un problema relativo alla modellazione dello scioglimento della neve, infatti se l'andamento delle portate simulate nel periodo invernale risultata abbastanza fedele alla realtà, nei mesi estivi vi è una sottostima del deflusso notevole.

Codice	2002/2011			2013/2017		
	Qm _{Oss}	Qm _{Sim}	Qm _{Oss} /Qm _{Sim}	Qm _{Oss}	Qm _{Sim}	Qm _{Oss} /Qm _{Sim}
POTO	75.39	78.22	0.96	83.04	80.29	1.03
POCT	117.17	110.29	1.06	141.70	132.55	1.07
POCM	215.20	271.75	0.79	189.43	221.86	0.85
POIS	438.23	399.17	1.10	449.61	429.01	1.05
MAIRC	10.95	15.14	0.72	14.82	16.68	0.89
ORCSB	17.89	16.15	1.11	21.35	19.35	1.10
SOAPO	6.95	5.63	1.23	7.80	6.43	1.21
TANFA	37.05	28.19	1.31	38.89	31.66	1.23
TANMO	120.53	123.92	0.97	132.51	132.48	1.00
CEVQU	29.32	20.99	1.40	27.65	22.94	1.21
AGONO	8.37	8.67	0.97	9.26	9.84	0.94
DBATA	90.32	49.00	1.84	95.98	50.43	1.90
SLATO	22.03	18.96	1.16	23.95	19.98	1.20
DRITO	22.37	17.48	1.28	25.24	20.09	1.26
DRIOU	4.44	2.23	1.99	4.62	2.98	1.55

Tabella 3-4. Portate medie osservate e simulate per i vari bacini.

Un'ultima osservazione va fatta sui grafici scatterplot e sugli idrogrammi, di cui qui se ne illustrano soltanto un paio a titolo d'esempio. Dagli scatterplot Portate Misurate-Portate Simulate si può notare come vi sia una buona aderenza tra le portate simulate e quelle osservate con i punti che si distribuiscono in modo adeguato intorno alla linea di identità. Sugli idrogrammi è inoltre riportata l'informazione relativa al valore R^2 che risulta maggiore di 0.5 nell'85% dei casi. Negli idrogrammi riportati qui a titolo esplicativo è inoltre ben presente il problema del base-flow in quello relativo al 2017; problema risolto in fase di calibrazione.

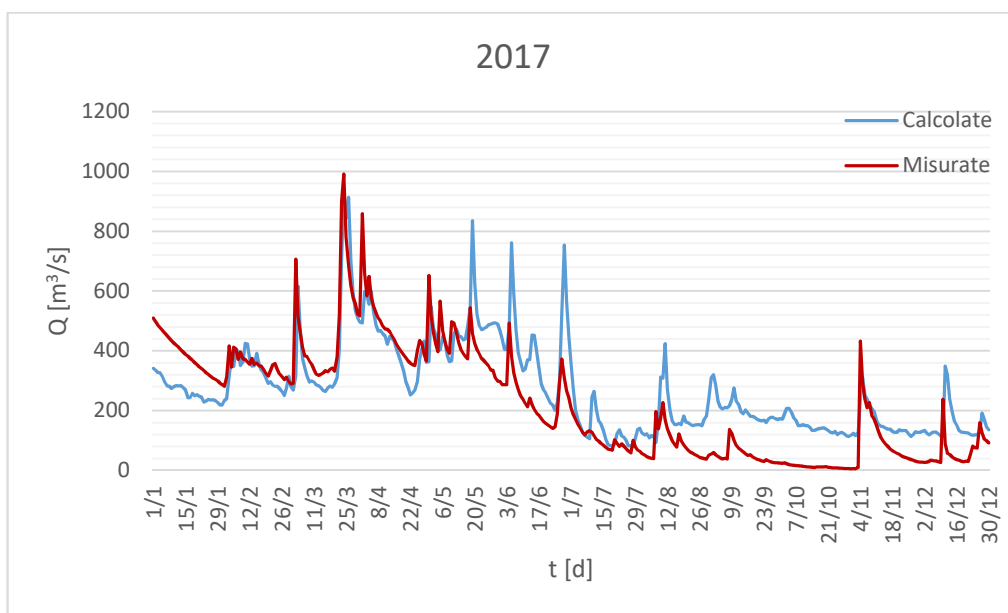
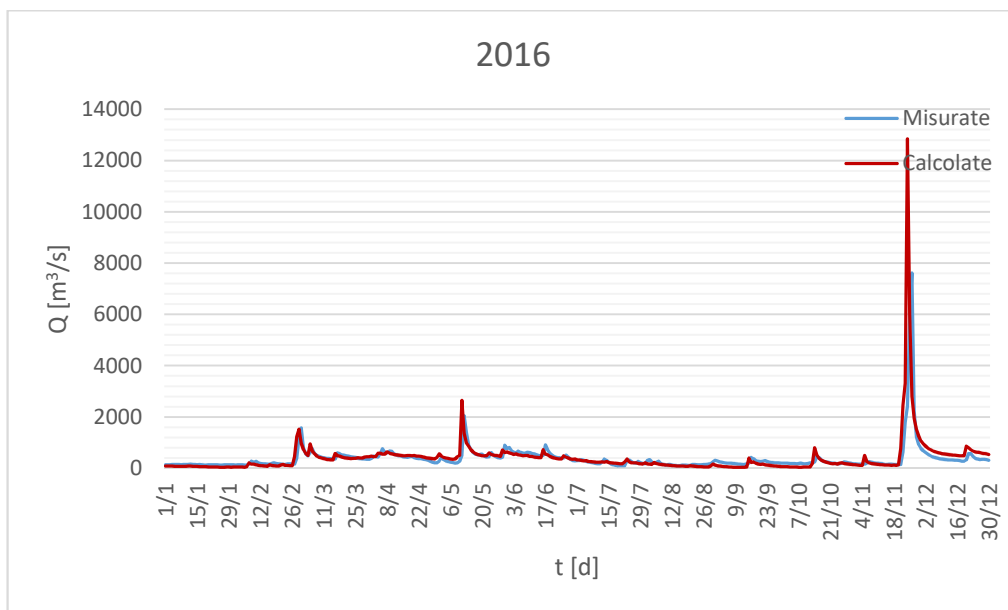
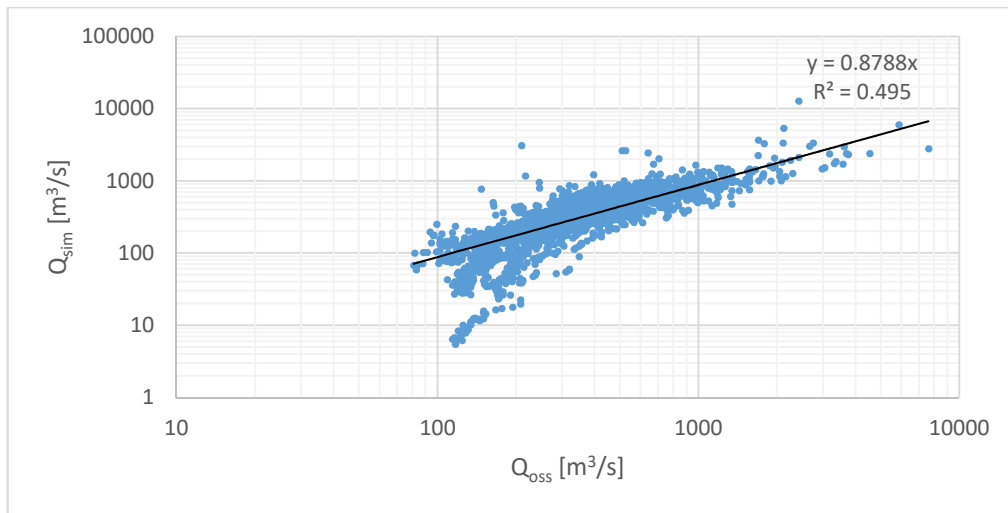


Figure 3-10. Scatterplot (2013/17) ed idrogrammi della sezione di misure del Po ad Isola Sant'Antonio.

3.2.3 Il grigliato NWIOI

In relazione a quanto detto nel precedente paragrafo, ossia al fatto che si è notato un piccolo ritardo temporale del picco di piena simulato rispetto a quello osservato e che la medesima situazione si è riscontrata anche nel database del grigliato delle piogge NWIOI di ARPA Piemonte, si riportano alcune ulteriori considerazioni.

Nell'immagine sottostante è rappresentato l'andamento delle precipitazioni misurate dalla stazione pluviometrica di Torino, in via della Consolata, e delle corrispondenti relative al punto del grigliato più prossimo alla stazione, in due differenti intervalli temporali (Novembre 2016 e Novembre 2017).

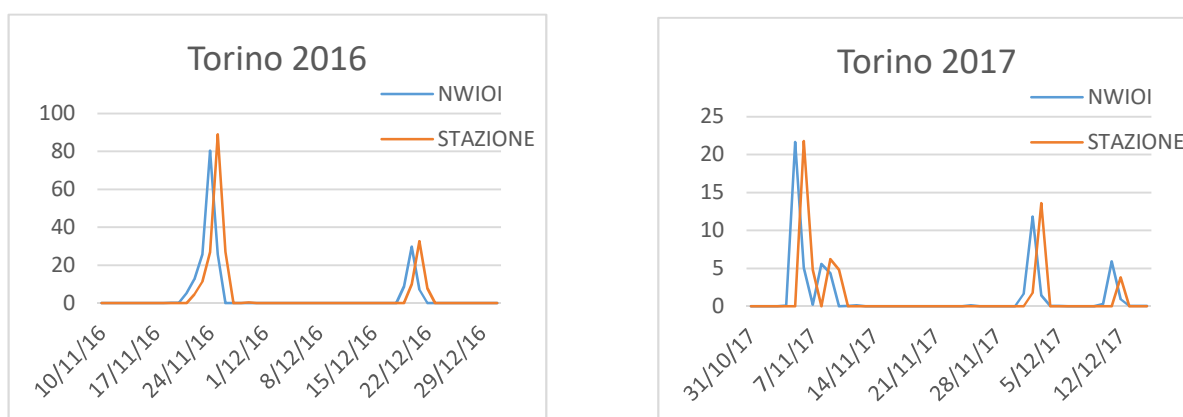


Figura 3-11. Raffronto tra l'andamento delle precipitazioni [mm] della stazione pluviometrica di Torino via della Consolata e del grigliato NWIOI.

Un'ulteriore prova di tutto ciò la si può avere dall'indice di correlazione riportato nella tabella sottostante, per tre differenti anni, della precipitazione media giornaliera e delle temperature massime e minime giornaliere.

		Ind. di Correlazione	
		Pred.	Trasl.
Intervallo 1/1/2010 12/31/2010	PREC	0.39	0.98
	T _{min}	1.00	0.98
	T _{max}	1.00	0.95
Intervallo 1/1/2016 12/31/2016	PREC	0.28	0.97
	T _{min}	1.00	0.97
	T _{max}	1.00	0.94
Intervallo 1/1/2017 12/31/2017	PREC	0.25	0.97
	T _{min}	1.00	0.97
	T _{max}	1.00	0.95

Tabella 3-5. Indice di correlazione delle precipitazioni e delle temperature, massime e minime.

Si può notare che, trasladando di un giorno in avanti la serie di precipitazione del

grigliato, l'indice aumenta fino a tendere all'unità. Analogo problema non si nota per le temperature.

Le medesime considerazioni possono farsi anche in altre zone del bacino. Di seguito si riportano gli stessi grafici e la stessa tabella relative alla stazione pluviometrica di Farigliano, sul Tanaro in provincia di Cuneo. L'indice di correlazione è calcolato in questo caso solo per la precipitazione poiché è l'unico dato che la stazione fornisce.

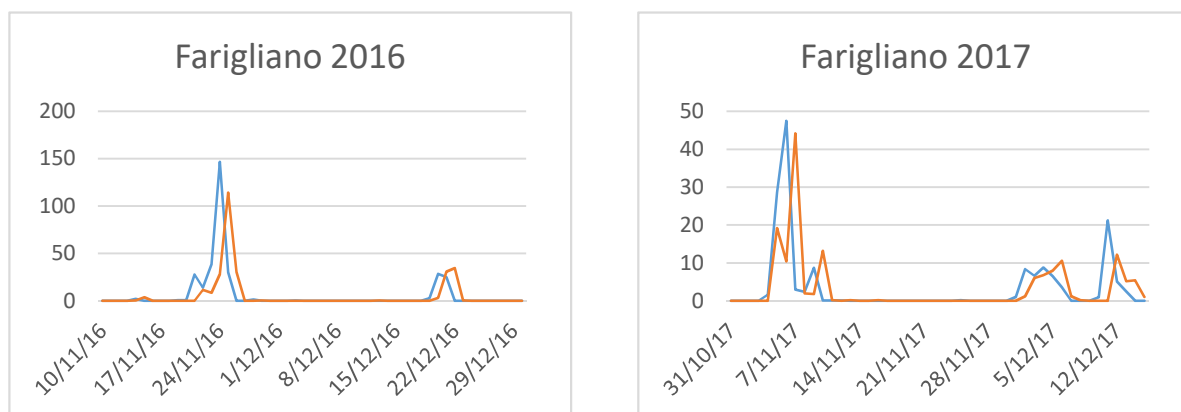


Figura 3-12. Raffronto tra l'andamento delle precipitazioni [mm] della stazione pluviometrica di Farigliano e del grigliato NWIOI.

		Ind. di Correlazione	
		Pred.	Trasl.
Intervallo 1/1/2010 12/31/2010	PREC	0.30	0.94
Intervallo 1/1/2016 12/31/2016	PREC	0.41	0.96
Intervallo 1/1/2017 12/31/2017	PREC	0.30	0.95

Tabella 3-6. Indice di correlazione delle precipitazioni.

4 LA CALIBRAZIONE DEL MODELLO SWAT

4.1 SWATCUP

Al fine di calibrare il modello SWAT costruito, è stato utilizzato il software STAT-CUP (Calibration and Uncertainty Procedures) (Abbaspour et al., 2007), un programma standalone sviluppato per la calibrazione di SWAT.

Il programma contiene cinque diverse procedure di calibrazione e include funzionalità per la validazione e l'analisi di sensibilità, nonché la visualizzazione dell'area di studio utilizzando Bing Map. Nel lavoro corrente abbiamo utilizzato il programma SUFI-2 (Abbaspour et al., 2004, Abbaspour et al., 2007) per la calibrazione del modello e l'analisi dell'incertezza. Per i modelli su vasta scala che richiedono molto tempo, SUFI-2 è risultato essere abbastanza efficiente (Yang et al., 2008).

L'algoritmo SUFI-2, utilizzato per la calibrazione del modello e l'analisi di sensibilità, è una calibrazione di tipo "stocastica", non "deterministico"; nel senso che non si basa soltanto nel cambiare un set di parametri e valutarne l'errore fin quando non si giunge ad una soluzione ragionevole, ma svolge anche un'analisi dell'incertezza della modellazione.

Questo algoritmo, infatti, mappa tutte le incertezze, che possono essere relative ad i dati di input, al modello concettuale o ad i parametri utilizzati e che si traducono in un'incertezza della variabile di output del modello. SWAT-CUP cerca di catturare la maggior parte degli output calcolati entro l'incertezza di previsione del 95% (95PPU) del modello in un processo iterativo. Il 95PPU viene calcolato ai livelli del 2,5% e del 97,5% della distribuzione cumulativa di una variabile di output, generata dalla propagazione dell'incertezza di un parametro tramite la tecnica di campionamento Latin Hypercube. In questo modo non si ha un semplice segnale che rappresenta l'output ma un involuppo di soluzioni accettabili, espresse dal 95PPU. Ciò che si vuole è che il 95PPU involuppi la maggior parte dei dati osservati, ossia delle portate misurate.

Per quantificare la bontà dell'adattamento, poiché si sta confrontando una banda (il 95PPU) con un singolo segnale espresso dai dati misurati (più eventuali errori nella misurazione) l'algoritmo SUFI-2 fornisce due indici denominati " P-factor " ed " R-factor ". Il P-factor rappresenta la percentuale dei

dati osservati involuppati dai risultati della calibrazione del modello mentre l'R-factor misura lo "spessore" dell'involuppo. Il P-factor varia tra 0 ed 1 dove l'unità rappresenta l'ottimo, ossia che il 100% dei dati misurati risulta all'interno dell'incertezza di previsione del modello. Un P-factor maggiore può essere ottenuto a spese di un R-factor maggiore. Spesso, quindi, è necessario raggiungere un equilibrio tra i due fattori, ossia si vuole un P-factor il più grande possibile con un R-factor, cioè un'incertezza, il più piccolo possibile. Ciò dipende ovviamente dalla bontà del progetto, dall'adeguatezza dell'input e dei parametri della calibrazione. Nell'iterazione finale, cioè quando si ottengono i valori di P-factor ed R-factor desiderati, si vanno a controllare anche i valori delle funzioni obiettivo ottenuti. SUFI-2 consente l'utilizzo di dieci diverse funzioni obiettivo come R^2 , l'indice di Nash-Sutcliffe (NS), il PBIAS ed altre ancora.

SUFI-2 esegue la calibrazione tramite successive iterazioni, in genere meno di 5, in ciascuna delle quali diminuisce il range dei parametri modificabili impostati. Zoomando sulla regione dello spazio dei parametri migliori ottenuti dalla precedente iterazione, si ottiene di volta in volta una soluzione migliore nei termini della funzione obiettivo scelta ma il P-factor e l'R-factor diminuiscono, perché appunto l'intervallo dei parametri si riduce. Nel scegliere la migliore soluzione bisogna cercare di raggiungere un giusto compromesso tra questi fattori.

4.1.1 Protocollo di calibrazione

Per calibrare il modello si utilizza il seguente approccio generale.

Per prima cosa, costruito il modello con ArcSWAT utilizzando le migliori stime dei parametri basate sui dati e la letteratura disponibili, si confrontano i risultati del modello con le osservazioni. Infatti, è necessario che le prestazioni del modello predefinito non siano troppo diverse dalle misurazioni, altrimenti la calibrazione potrebbe essere di scarso aiuto.

Sulla base delle prestazioni del modello di default si scelgono i parametri da calibrare, andando a cercare in letteratura quelli che più si adattano alle proprie esigenze.

Ai parametri scelti si assegnano dunque degli intervalli iniziali, in questa fase è molto importante l'esperienza e la conoscenza idrologica; in mancanza il programma prevede una tabella con degli intervalli di default al di fuori dei quali i parametri non possono trovarsi.

Dopo aver parametrizzato il modello e assegnato gli intervalli, viene eseguito il programma circa 300-1000 volte, in base al numero di parametri, alla velocità dell'esecuzione del modello e alle capacità del sistema.

Dopo che tutte le simulazioni sono state completate; l'opzione di post elaborazione in SWAT-CUP calcola la funzione obiettivo e il 95PPU per tutte le variabili osservate. Nuovi intervalli di parametri sono suggeriti dal programma per un'altra iterazione, che modifica i range precedenti focalizzandosi sul miglior set di parametri dell'iterazione corrente.

I nuovi intervalli di parametri suggeriti potrebbero essere modificati dall'utente utilizzando nuovamente la tabella degli intervalli di default e l'analisi di sensitività. Viene quindi eseguita un'altra iterazione. La procedura continua fino al raggiungimento di risultati soddisfacenti, in termini di P-factor ed R-factor oltre che della funzione obiettivo. Normalmente, da tre a cinque iterazioni sono sufficienti per risultati soddisfacenti.

4.2 I risultati della calibrazione

4.2.1 Gli obiettivi della calibrazione

In questa calibrazione si vuole andare a migliorare la qualità della serie delle portate in uscita nella sezione corrispondente alla stazione idrometrica di Isola Sant'Antonio (POIS). Il periodo scelto per la calibrazione in questo caso è l'intervallo 1998/2011. Per questa sezione, infatti, la serie di portate osservate disponibile parte dal 1998, a differenza della maggior parte delle altre sezioni dove le stazioni registrano dati solo dal 2012/2013. Per la validazione, invece, l'intervallo scelto è il 2013/2017 (5 anni).

Osservando i risultati del modello predefinito, riportati nel capitolo precedente, si nota come la portata media in uscita da questa stazione sia leggermente sottostimata (V. Tabella 3.4). Inoltre, dagli idrogrammi riportati in Figura 3.12 si nota come i picchi più alti siano sovrastimati (2016) mentre il base-flow è

troppo basso come si può notare dall'idrogramma relativo al 2017.

Tutto questo si riflette anche in un peggioramento generale dei valori assunti dalle funzioni obiettivo nell'intervallo temporale della validazione 2013/17 (V. Tabella 3.3) rispetto ad i corrispondenti relativi al periodo della calibrazione 2002/2011 (V. Tabella 3.2).

Quindi ricapitolando, gli obiettivi di questa calibrazione, effettuata sulla base delle portate osservate nella stazione idrometrica di Isola Sant'Antonio (Al) dal 2002 al 2011, sono:

- Aumentare la portata media;
- Diminuire i picchi di portata eccezionali;
- Aumentare il base-flow;
- “Shiftare” leggermente i picchi verso destra.

Tutto ciò si dovrebbe tradurre in un miglioramento degli indici delle funzioni obiettivo non solo per quel che riguarda la sezione di Isola Sant'Antonio ma auspicabilmente anche per le altre, che tendenzialmente soffrono degli stessi problemi. In fase di validazione si andrà a verificare che ciò accada.

4.2.2 I parametri da calibrare

Al fine di raggiungere gli obiettivi prefissi, basandosi sulle indicazioni disponibili in letteratura (Abbaspour et al., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model), si è scelto di selezionare i seguenti parametri di calibrazione:

- SOL_AWC. Capacità d'acqua disponibile del suolo;
- SOL_CN2. Curve Number per la condizione di umidità n°II;
- GWQMN, ossia la soglia d'altezza d'acqua [mm] negli acquiferi superficiali richiesta per il flusso di ritorno. I flussi d'acqua sotterranea verso i corsi d'acqua sono permessi solo se l'altezza d'acqua negli acquiferi superficiali è uguale o maggiore del GWQMN;

- GW_REVAP (Groundwater “revap” coefficient). Se questo parametro tende a 0, il movimento dell’acqua dall’acquifero superficiale alla zona radicale si riduce; viceversa se tende ad 1 il tasso di trasferimento dell’acqua dall’acquifero superficiale alla zona radicale tende al tasso di evapotraspirazione potenziale. I valori del GW_REVAP dovrebbero essere compresi tra 0.02 e 0.2;
- REVAPMN. E’ la soglia dell’altezza d’acqua minima necessaria affinché l’acqua presente negli acquiferi superficiali si muova verso la zona radicale oppure percoli in profondità;
- GW_DELAY (Groundwater delay time). E’ il tempo che occorre affinché l’acqua esca dal profilo del suolo ed entri nell’acquifero superficiale e dipende dalla profondità della falda e dalle proprietà idrauliche del suolo.
- ESCO (Soil Evaporation Compensation Factor). Dovrebbe essere compreso tra 0.01 ed 1; per valori più bassi il modello è capace di estrarre un’aliquota maggiore della domanda evaporative dai livelli più bassi;
- HRU_SLP [mm] (Average Slope Steepness);
- OV_N. E’ il valore del coefficiente di Manning per i flussi terrestri;
- SLSUBBSN. E’ la distanza espressa in metri nel quale il tipo di flusso dominante è il “sheet flow”, ossia la distanza percorsa dall’acqua prima che cominci a ruscellare.
- ALPHA_BF (Baseflow alpha factor [1/d]).

Parametri come il GWQMN, il GW_REVAP, il REVAPMN sono da calibrare se si vuole andare a modificare il base-flow. Il CN_2, il SOL_AWC ed l’ESCO hanno invece un effetto maggiore sui flussi di picco mentre l’HRU_SLP, l’OV_N ed il SLSUBBSN sono da calibrare quando si vuole “traslare” il flusso.

Osservando la figura sotto riportata si nota come i parametri modificati siano stati assegnati a tutti i sottobacini che compongono l’area di studio. Per alcuni parametri come il SOL_AWC ed il CN2, però, cambia il metodo con il quale sono stati modificati. Infatti, mentre per alcuni si è utilizzato il metodo

“Replace” che va semplicemente a sostituire il parametro predefinito con quello calibrato, per altri si è utilizzato il metodo “Relative”. Alcuni parametri, infatti, cambiano per ogni HRU, essendo funzioni del tipo di suolo/uso del suolo e perciò, al fine di mantenere la distribuzione spaziale di questi parametri, si è utilizzato il metodo “Relative”, che va a moltiplicare il valore esistente per “1+ il valore dato”. Gli intervalli utilizzati per i vari parametri di calibrazione sono quelli suggeriti dal programma.

Basic Information				Value			Filter Conditions (optional)			
#	Par Name	File Name	File Ext.	Method	Min	Max	Hydro Grp	Soil Texture	Landuse	Subbasins
1	SOL_AWC		.sol	I' Relative	-0.25	0.25				(All)
2	CN2		.mgt	I' Relative	-0.25	0.25				(All)
3	GWQMN		.gw	V Replace	0	5000				(All)
4	GW_REVAP		.gw	V Replace	0.02	0.2				(All)
5	REVAPMN		.gw	V Replace	0	800				(All)
6	ESCO		.hru	V Replace	0	1				(All)
7	GW_DELAY		.gw	V Replace	0	500				(All)
8	HRU_SLP		.hru	I' Relative	-0.25	0.25				(All)
9	OV_N		.hru	I' Relative	-0.25	0.25				(All)
10	SLSUBBSN		.hru	I' Relative	-0.25	0.25				(All)

Figura 4-1. Schermata dei parametri di calibrazione in SWAT-CUP.

Una volta terminata ciascuna iterazione, SWAT-CUP fornisce i dati relativi all’analisi di sensibilità. Nella figura sottostante è riportata l’analisi relativa alla prima iterazione, dove alcuni parametri non erano ancora stati inseriti.

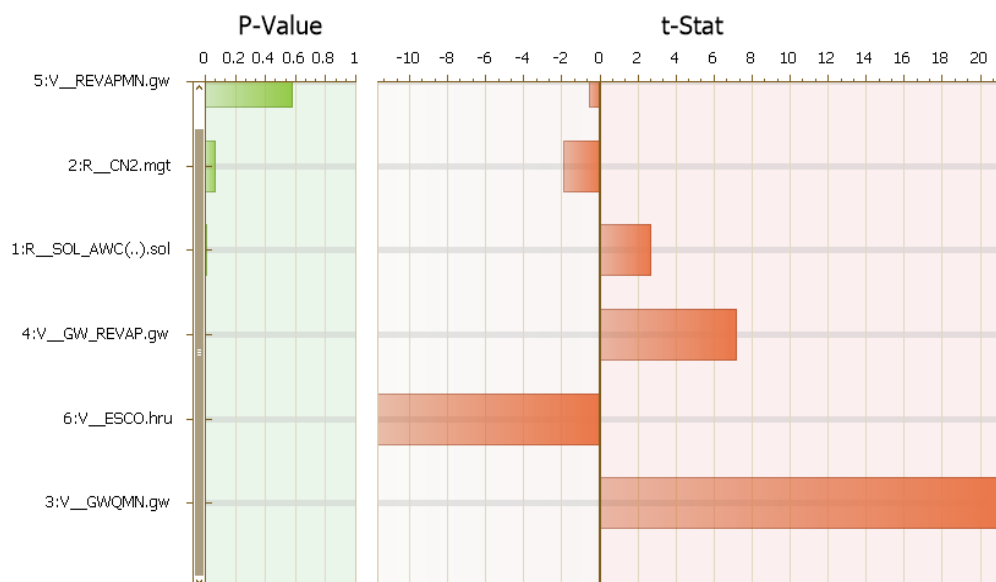


Figura 4-2. Analisi di sensibilità.

In questo tipo di analisi quanto più il “t-stat” è grande, in valore assoluto, e

quanto più è piccolo il valore di “p-stat”, tanto più il parametro è sensibile. Osservando l’immagine, quindi, si può osservare che i parametri più importanti da questo punto di vista sono il GWQMN, il GW_REVAP e l’ESCO ed il SOL_AWC.

Un’ulteriore dimostrazione di ciò si può notare dai grafici “Dotty Plots”, di cui si riporta, a titolo di esempio, quello relativo al GWQMN. Osservandolo si può notare come il PBIAS cambi al variare del valore del GWQMN e come vi sia una netta tendenza del PBIAS a diminuire per valori sempre più piccoli del GWQMN fino a raggiungere, nell’ultima iterazione, un equilibrio con il PBIAS che si mantiene costante intorno a 10.

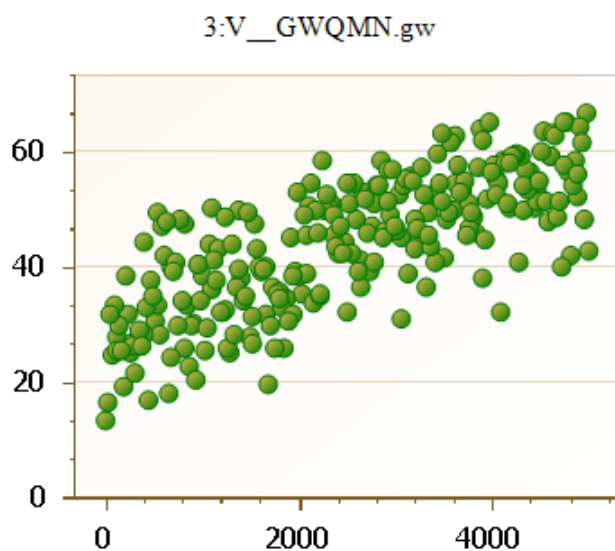


Figura 4-3. Dotty Plot GWQMN-PBIAS relativo alla 1° iterazione.

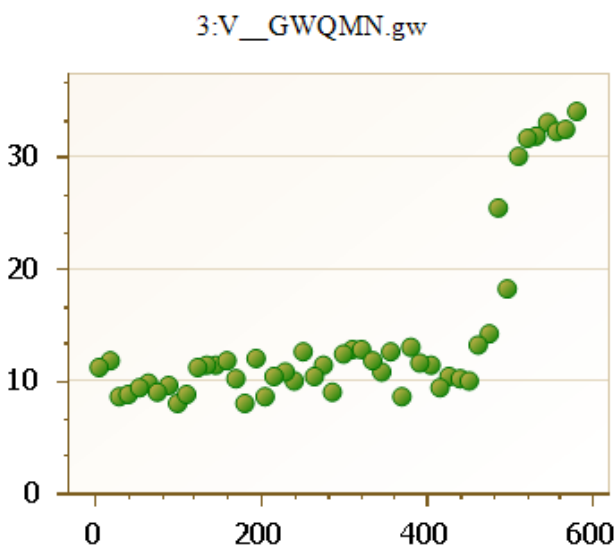


Figura 4-4. Dotty Plot GWQMN-PBIAS relativo all’ultima iterazione.

4.2.3 I risultati del modello calibrato

Come già detto al paragrafo 4.2.1, uno degli obiettivi della calibrazione è quello di aumentare la portata media in uscita dalla stazione di Isola Sant'Antonio. Per fare ciò si sono utilizzate sostanzialmente due funzioni obiettivo, il PBIAS e l'indice di Nash-Sutcliffe, andando a scegliere di volta in volta, per ogni iterazione, quella che produceva un risultato migliore.

Dopo cinque iterazioni, le prime di 200 simulazioni, alla fine della quale il programma fornisce dei nuovi intervalli per i parametri di calibrazione, e l'ultima di sole 50, si è giunti ad una soluzione che rappresentasse un buon compromesso in termini di "P-factor", "R-factor", dell'indice di Nash-Sutcliffe e del PBIAS. I risultati dell'ultima iterazione sono riportati nel report sottostante.

Goal_type= PBIAS No_sims= 100 Best_sim_no= 38 Best_goal = 9.067767e+000									
Variable	p-factor	r-factor	R2	NS	bR2	MSE	SSQR	PBIAS	
FLOW_OUT_64	0.77	0.46	0.60	0.59	0.3431	1.2e+005	4.0e+004	9.1	
KGE	RSR	MNS	VOL_FR	--- Mean_sim(Mean_obs)		StdDev_sim(StdDev_obs)			
0.64	0.64	0.41	1.10	398.66(438.42)		393.96(536.00)			
Behavioral threshold= 10.000000-----Nuber of behavioral simulations = 12									
Variable	p-factor	r-factor	R2	NS	bR2	MSE	SSQR	PBIAS	
FLOW_OUT_64	0.53	0.30	0.60	0.59	0.3431	1.2e+005	4.0e+004	9.1	
KGE	RSR	MNS	VOL_FR	--- Mean_sim(Mean_obs)		StdDev_sim(StdDev_obs)			
0.64	0.64	0.00	1.10	398.66(438.42)		393.96(536.00)			

Tabella 4-1. Report dell'ultima iterazione di calibrazione.

Come si può notare, in termini di "P-factor" ed "R-factor" (V. Paragrafo 4.1) si ottengono dei buoni risultati, essendo il P-factor maggiore di 0.7 e l'R-factor minore di 0.5, come richiesto nella guida del programma. Altro obiettivo raggiunto è quello dell'aumento della portata media, 399 m³/s a fronte di 379 m³/s che era il valore simulato antecedente la calibrazione per il periodo 1998/2011. L'indice di Nash-Sutcliffe e l'RSR risultano ugualmente soddisfacenti, essendo NS>0.5 ed RSR<0.7.

I parametri migliori, riportati da SWAT-CUP e da andare ad inserire in ArcSWAT al fine della successiva validazione, risultano essere:

r__SOL_AWC().sol	0.097613	r__CN2.mgt	-0.314929
v__GWQMN.gw	327.584595	v__GW_REVAP.gw	0.186298
v__REVAPMN.gw	437.998413	v__ESCO.hru	0.998629
v__GW_DELAY.gw	21.8286/67.5423	r__HRU_SLP.hru	0.216484
r__OV_N.hru	-0.096698	r__SLSUBBSN.hru	0.072644

Nell'immagine successiva è, infine, riportato l'idrogramma per il periodo di calibrazione 1998/2011, ottenuto da SWAT-CUP.

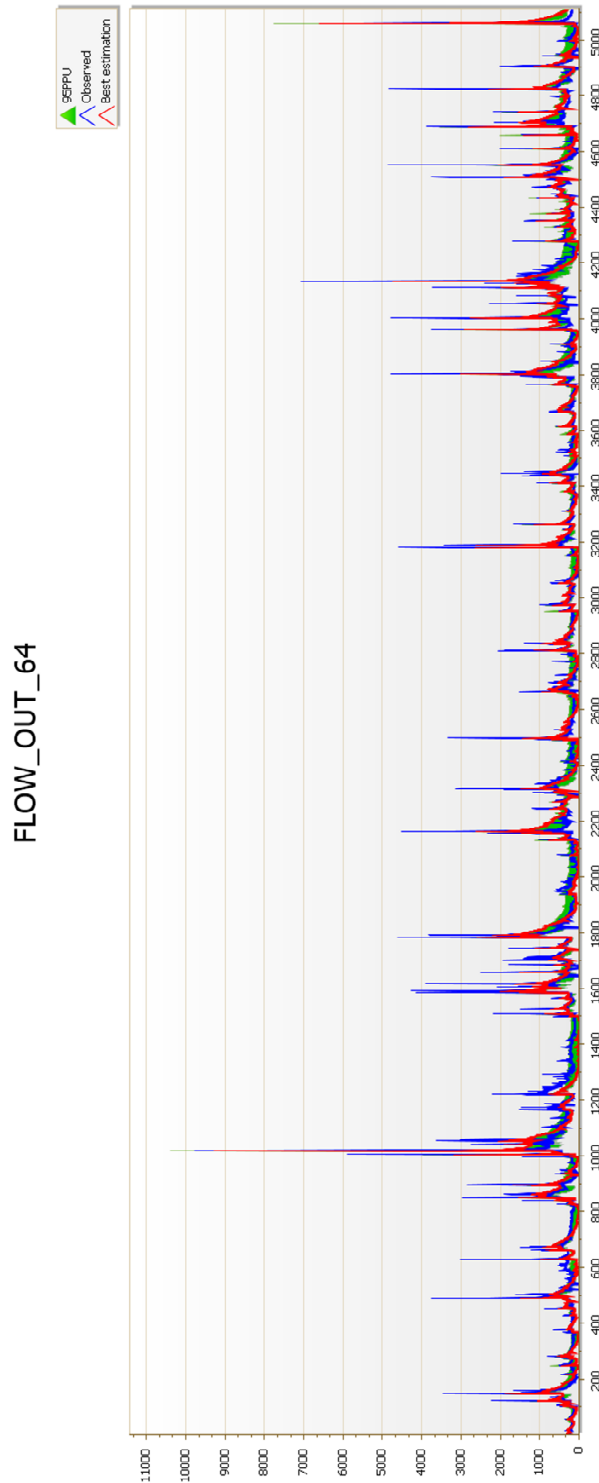


Figura 4-5. 95ppu Plot tratto da SWAT-CUP.

4.2.4 La validazione dei deflussi nelle sezioni di confronto

Nelle tabelle sottostanti sono riportati i risultati ottenuti dal modello SWAT per il periodo di validazione relativi al modello predefinito ed a quello calibrato, in tutte le sezioni descritte al Paragrafo 3.2.

2013/2017								
Codice	Area Bacino	Quota media	NS	RMSE	MAE	PBIAS	RSR	MRE
POTO	5355	914	0.03	86.45	27.42	3.31	0.99	0.38
POCT	7685	1083	0.25	129.68	82.04	6.46	0.87	0.31
POCM	13732	1257	0.15	189.81	80.28	-17.12	0.92	0.57
POIS	25640	959	0.32	370.59	146.07	4.58	0.82	0.35
MAIRC	1326	976	0.06	13.19	7.14	-12.54	0.97	1.34
ORCSB	838	1567	0.68	17.39	8.23	9.37	0.57	0.74
SOAPO	215	1898	0.37	4.79	2.67	17.47	0.79	0.39
TANFA	1502	945	0.69	40.30	14.25	18.60	0.56	0.38
TANMO	7956	657	0.47	139.43	46.85	0.02	0.73	0.44
CEVQU	1002	504	0.56	28.39	13.55	17.06	0.66	0.54
AGONO	382	332	0.63	7.63	3.66	-6.23	0.61	0.54
DBATA	3321	2087	0.01	74.64	49.95	47.46	0.99	0.47
SLATO	880	1368	0.64	22.46	9.66	16.57	0.60	0.46
DRITO	1322	1365	0.12	18.17	9.52	20.40	0.94	0.41
DRIOU	260	2164	0.24	3.15	2.26	35.41	0.87	0.56

Tabella 4-2. Valori assunti dalle funzioni obiettivo relativi al modello predefinito.

2013/2017								
Codice	Area Bacino	Quota media	NS	RMSE	MAE	PBIAS	RSR	MRE
POTO	5355	914	0.35	70.61	24.39	-4.40	0.81	0.33
POCT	7685	1083	0.48	108.13	91.12	2.33	0.72	0.26
POCM	13732	1257	0.39	161.00	84.63	-24.51	0.78	0.70
POIS	25640	959	0.54	305.46	129.80	-1.71	0.68	0.32
MAIRC	1326	976	0.35	10.95	7.13	-21.85	0.81	2.95
ORCSB	838	1567	0.65	18.29	9.09	5.13	0.59	0.93
SOAPO	215	1898	0.65	3.59	2.36	14.30	0.59	0.33
TANFA	1502	945	0.69	40.16	13.89	15.61	0.55	0.36
TANMO	7956	657	0.59	123.24	47.01	-6.43	0.64	0.55
CEVQU	1002	504	0.41	33.03	12.14	10.30	0.77	0.45
AGONO	382	332	0.70	6.94	3.89	-11.02	0.55	0.62
DBATA	3321	2087	0.02	74.15	49.54	45.15	0.99	0.46
SLATO	880	1368	0.64	22.68	9.79	12.81	0.60	0.46
DRITO	1322	1365	0.38	15.20	7.79	17.14	0.79	0.30
DRIOU	260	2164	0.38	2.86	2.10	30.95	0.79	0.52

Tabella 4-3. Valori assunti dalle funzioni obiettivo relativi al modello calibrato.

Osservando le tabelle si può notare come, pur essendo basata soltanto sulle

portate osservate ad Isola Sant'Antonio, la calibrazione porta ad un risultato generalmente migliore su tutto il bacino studiato, seppur di poco in alcuni casi. Ciò si nota ancora meglio dai grafici sotto riportati. In quello sottostante, ad esempio, si vede come l'indice di Nash-Sutcliffe sia aumentato in tutte le stazioni fatta eccezione per l'Orco a San Benigno Canavese, il Tanaro a Farigliano, la Stura a Torino e la Dora Baltea a Tavagnasco, dove rimane costante, e il Cervo a Quinto Vercellese, dove peggiora leggermente.

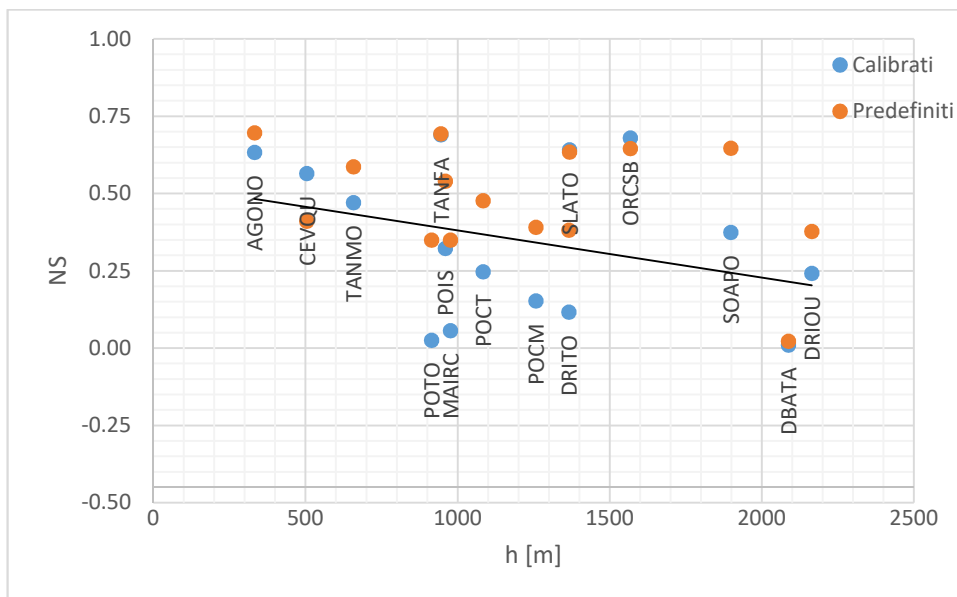


Figura 4-6. Indice di Nash-Sutcliffe relativo ad il modello calibrato ed quello predefinito.

Si possono fare delle considerazioni analoghe relativamente all'indice RSR, riportato nella figura sottostante.

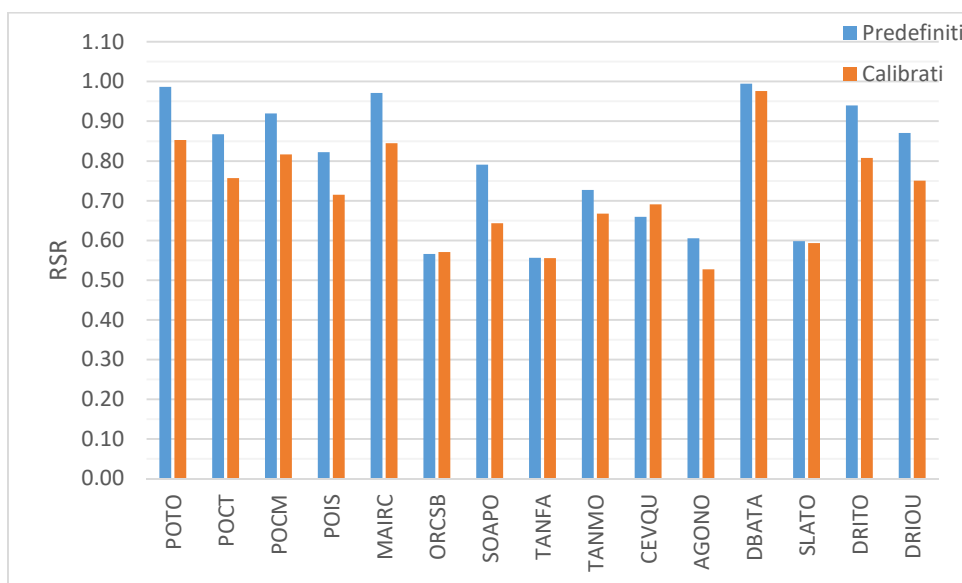


Figura 4-7. Valori dell'indice RSR pre/post calibrazione per le varie stazioni.

Per quando riguarda indici come il PBIAS ed il MRE (Errore relativo Medio) vi sono dei miglioramenti solo nelle stazioni dove la portata media simulata risultava inferiore a quella calcolata, nelle altre dove già era sovrastimata, invece, vi sono dei leggeri peggioramenti. Comunque in termini di PBIAS si ottengono degli ottimi risultati; risulta, infatti, $PBIAS < \pm 15$ (equivalente ad una buona performance secondo Moriasi et al.) in 11 casi su 15 a fronte degli 8 casi ottenuti nel modello predefinito. In 8 casi, invece, si ottiene un $PBIAS < \pm 10$, ovvero una performance molto buona, mentre solo in 2 casi risulta insoddisfacente ($> \pm 25$), corrispondenti ad i bacini montani sopra i 2000 m s.l.m.

La calibrazione, comunque, ha portato ad un generale aumento della portata media in uscita da tutte le sezioni, come evince dalla tabella sottostante.

13/17	Predefinite			Calibrate		
Codice	Qm _{Oss}	Qm _{Sim}	Qm _{Oss} /Qm _{Sim}	Qm _{Oss}	Qm _{Sim}	Qm _{Oss} /Qm _{Sim}
POTO	83.04	80.29	1.03	83.04	86.70	0.96
POCT	141.70	132.55	1.07	141.70	138.41	1.02
POCM	189.43	221.86	0.85	189.43	235.85	0.80
POIS	449.61	429.01	1.05	449.61	457.32	0.98
MAIRC	14.82	16.68	0.89	14.82	18.06	0.82
ORCSB	21.35	19.35	1.10	21.35	20.26	1.05
SOAPO	7.80	6.43	1.21	7.80	6.68	1.17
TANFA	38.89	31.66	1.23	38.89	32.82	1.19
TANMO	132.51	132.48	1.00	132.51	141.03	0.94
CEVQU	27.65	22.94	1.21	27.65	24.81	1.11
AGONO	9.26	9.84	0.94	9.26	10.28	0.90
DBATA	95.98	50.43	1.90	95.98	52.65	1.82
SLATO	23.95	19.98	1.20	23.95	20.88	1.15
DRITO	25.24	20.09	1.26	25.24	20.91	1.20
DRIOU	4.62	2.98	1.55	4.62	3.19	1.45

Figura 4-8. Portate medie ottenute a fine calibrazione e del modello predefinito in m³/s per il 2013/17.

Il rapporto tra le portate medie simulate e quelle calcolate risulta sempre al di sotto del 20%, ad eccezione delle sezioni aventi elevazione maggiore (DBATA e DRIOU), a riprova che ancora una volta il modello non risulta adatto a simulare i bacini montani.

Infine, dall'idrogramma per il 2017 e dallo scatterplot Portate Osservate/Calibrate nel 2013/17, relativi alla stazione del Po ad Isola Sant'antonio (POIS) e riportati di seguito a titolo di esempio, si nota come il

problema relativo al base-flow sia superato. Una simile osservazione si può fare guardando i grafici riportati in appendice. Il parametro che maggiormente ha inciso su questo risultato è stato il GW_DELAY.

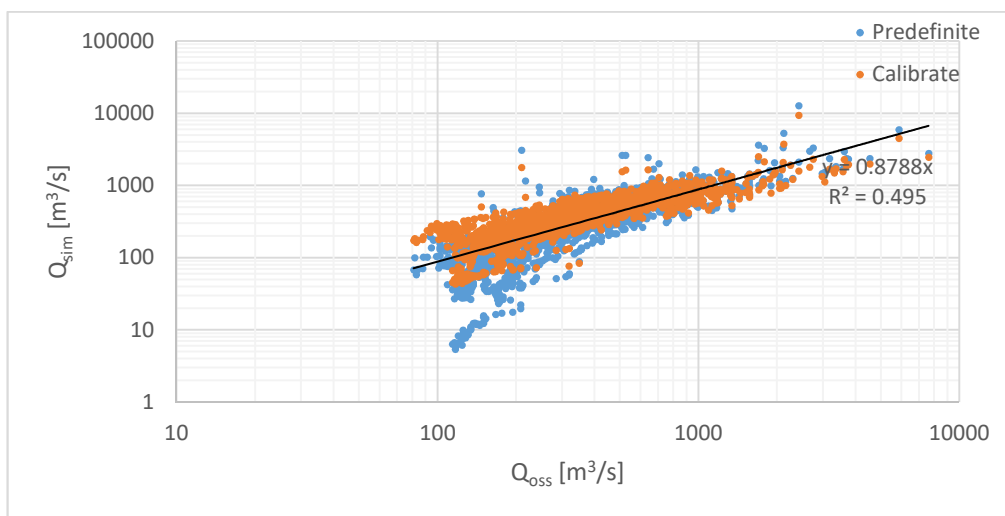


Figura 4-9. Scatterplot relativo alla sezione POIS ed all'intervallo di validazione 13/17.

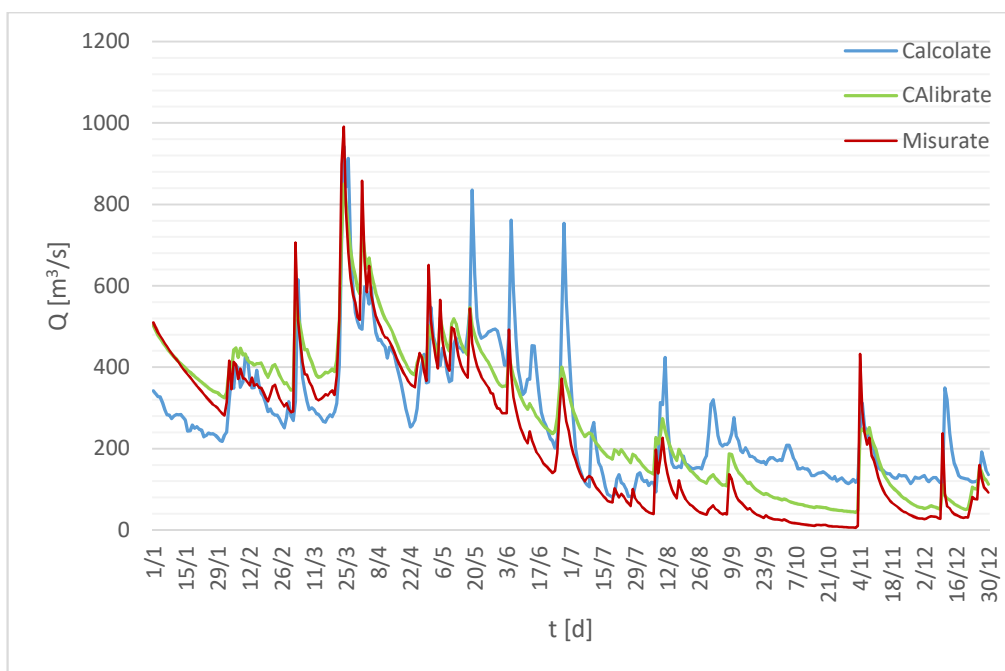


Figura 4-10. Idrogramma relativo alla sezione POIS del 2017.

CONCLUSIONI

Il lavoro svolto, descritto in questa trattazione, è stato finalizzato alla costruzione di un modello di bilancio idrico a scala giornaliera dell'area idrografica Piemonte-Valle D'Aosta. Il modello è stato implementato grazie all'ausilio del software ArcSWAT, un'estensione per ArcMap del modello SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold et al., 1993).

SWAT è un modello open source, fisicamente basato, che richiede specifiche informazioni su topografia del territorio, suolo, uso del suolo, clima e pratiche gestionali. E' uno strumento utilizzato con successo in tutto il mondo per studi gestionali sull'uso del suolo e sulle risorse idriche. Sebbene SWAT sia stato sviluppato in principio per quantificare l'impatto delle pratiche di gestione del territorio in bacini di grandi dimensioni e per lo più pianeggianti, il suo utilizzo è possibile per ogni tipo di bacino e si è voluta verificare la sua adattabilità a bacini come quelli Piemontesi.

La prima parte del lavoro si è concentrata sulla ricerca dei dati da adoperare per implementare il modello. Per quanto riguarda i dati di utilizzo e caratteristiche del suolo, la scelta è ricaduta sulle banche dati prodotte a livello Europeo quali il Corine Land Cover e l'European Soil Database che, alla scala utilizzata, offrono le informazioni più dettagliate e complete possibili; risultando, inoltre, particolarmente adatte all'implementazione in SWAT. Per ciò che concerne i dati climatici, invece, si è scelto di utilizzare il grigliato NWIOI (North Western Italy Optimal Intepolation) di Arpa Piemonte. Dopo aver esplorato anche altre possibilità, la scelta è ricaduta sul grigliato NWIOI perché offre numerosi vantaggi quali una buona risoluzione spaziale, ricopre un lungo intervallo temporale (dal 1958 ad oggi) ed, essendo l'origine dei dati dovuta a calcoli di interpolazione, non vi sono dei dati mancanti. Inoltre, rispetto ad altri dataset è di facile utilizzo e fruibilità.

Dopo la prima fase di raccolta informazioni, è stato possibile implementare il modello. SWAT divide i bacini fluviali in sottobacini composti a loro volta da più unità di risposta idrologica (HRU) caratterizzate da uso del suolo, tipologia di suolo e classe di pendenza omogenee. L'area di studio scelta è quella del bacino idrografico Piemonte-Valle d'Aosta, con sezione di chiusura posta in

corrispondenza della stazione idrometrica di Isola Sant'Antonio (Al), sul Po.

I risultati prodotti da ArcSWAT, in termini di portata media giornaliera, sono stati successivamente confrontati con le portate osservate in 15 stazioni idrometriche dislocate sul territorio Piemontese. Sono stati individuati due intervalli temporali; il 2002-2011, impiegato per la calibrazione del modello ed il 2013/2017, utilizzato per la validazione. La calibrazione è stata eseguita utilizzando il software SWAT-CUP (Abbaspour et al., 2007), un programma standalone sviluppato per la calibrazione di SWAT. La calibrazione è stata impostata sulla serie delle portate osservate in corrispondenza della stazione idrometrica di Isola Sant'Antonio.

I risultati ottenuti sono stati soddisfacenti nei termini delle funzioni obiettivo utilizzate, in particolare il PBIAS (Percentage Model BIAS) è risultato minore di ± 25 in 13 casi su 15 ed in 8 è risultato $PBIAS < \pm 10$, ovvero un valore molto buono secondo le classifiche utilizzate per questo genere di modelli. Risultati leggermente peggiori si sono ottenuti, invece, in termini di RSR (RMSE-observations standard deviation ratio) ed indice di Nash-Sutcliffe ($NS > 0.5$ ed $RSR < 0.7$ nel 50% dei casi). Anche dagli idrogrammi e dagli scatterplot Portate Osservate/Portate Misurate, inoltre, si è notata una buona aderenza tra la simulazione e la realtà.

In generale, quindi, si può affermare che SWAT sia stato capace di produrre dei buoni risultati già a partire dal modello predefinito, nel quale gli unici dati inseriti erano quelli di suolo/ uso del suolo ed i dati climatici (precipitazioni e temperature massime e minime giornaliere); migliorabili poi in fase di calibrazione grazie ad i dati sui deflussi.

Una delle criticità notate, risolte in fase di calibrazione, è relativa alla riproduzione dei deflussi nei periodi di magra, con un base-flow troppo basso. La maggior criticità osservata, però, è stata quella relativa ad i bacini montani sopra i 2000 m s.l.m. dove il modello è parso non cogliere bene il processo di scioglimento della neve.

Quest'aspetto potrebbe essere oggetto di studi futuri, impostando delle calibrazioni che siano finalizzate a risolvere questo problema. In generale, la fase di calibrazione è comunque meritevole di approfondimento, essendo

fortemente dipendente dall'esperienza acquisita in merito, data la mole di parametri che possono entrare in gioco e le tante combinazioni possibili. Sarebbe auspicabile una calibrazione "a cascata", ottimizzando per prima le portate uscenti dai bacini più a monte e procedendo poi verso valle. Un ulteriore sviluppo potrebbe essere poi quello di dividere il bacino studiato in più sottosistemi in modo tale da aumentare la risoluzione alla quale è trattato il problema. Infatti, così facendo si potrebbero individuare un maggior numero di sottobacini e, poiché SWAT assegna un solo record di dati climatici per sottobacino, si potrebbe ottenere sicuramente un risultato più accurato.

BIBLIOGRAFIA

1. Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Srinivasan, R.; Williams, J.R.; Haney, E.B.; Neitsch, S.L. (2013). SWAT 2012 Input/Output Documentation. Texas Water Resources Institute. Available at:
<https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>
2. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R., 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. [pdf] College Station: Texas Water Resources Institute. Available at: <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
3. Abbaspour K. SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs: A User Manual. Department of Systems Analysis. Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland (2015)
4. Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
5. Ganora D., Gallo E., Laio F., Masoero A., Claps P., *Analisi idrologiche e valutazioni del potenziale idroelettrico dei bacini Piemontesi.*
6. *Atlante dei Bacini Imbriferi Piemontesi.* Available at:
http://www.idrologia.polito.it/didattica/PIT/2013/2_AnalisiRegionale/AltroMateriale/DATI_AtlanteBaciniImbriferi.pdf
7. De Luca D., Lo Port a., Leone A., Piovesan G., “Applicazione a scala nazionale per l’Italia del modello idrologico SWAT” (2009)
8. European Environment Agency. CORINE land cover. Available at:
<http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/download-mais/corine-land-cover>
9. European Environment Agency. CORINE land cover. Available at:
<https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>

10. For ESDB v2.0: "The European Soil Database distribution version 2.0, European Commission and the European Soil Bureau Network, CD-ROM, EUR 19945 EN, 2004"
11. Panagos Panos. The European soil database (2006) GEO: connexion, 5 (7), pp. 32-33
12. Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., Alewell, C. Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS, Science of Total Environment, 479–480 (2014) pp. 189–200
13. Toth, B., Weynants, M., Nemes, A., Mako, A., Bilas, G., Toth, G., 2014. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. European Journal of Soil Science
14. Tóth, B., Weynants, M., Pásztor, L., Hengl, T. 2017. 3D Soil Hydraulic Database of Europe at 250 m resolution. Hydrol. Process., <https://doi.org/10.1002/hyp.11203>
15. Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55 Rev.). by R. G. Cronshey, R. T. Roberts, N. Miller, USDA Soil Conservation Service, Hydrology Unit, Washington, DC, USA
16. Cinquant'anni di dati meteo-climatici in Piemonte, Arpa, available at: <http://rsaonline.arpa.piemonte.it/meteoclima50/intro.htm>
17. Uboldi, F., Lussana, C. and Salvati, M. (2008), Three-dimensional spatial interpolation of surface meteorological observations from high-resolution local networks. Meteorological Applications, 15: 331–345, doi: 10.1002/met.76
18. M. Turco, A. L. Zollo, C. Ronchi, C. De Luigi, and P. Mercogliano (2013). Assessing gridded observations for daily precipitation extremes in the Alps with a focus on northwest Italy
19. Piemonte, «ARPA Piemonte Accesso Richiesta Dati,» [Online]. Available: <http://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/Richieste-dati-formato-standard/richiesta-dati/Richiesta-automatica/Dati-giornalieri-richiesta-automatica.html>
20. A. Piemonte, «Annali Metereologici ed idrologico: Banca Dati

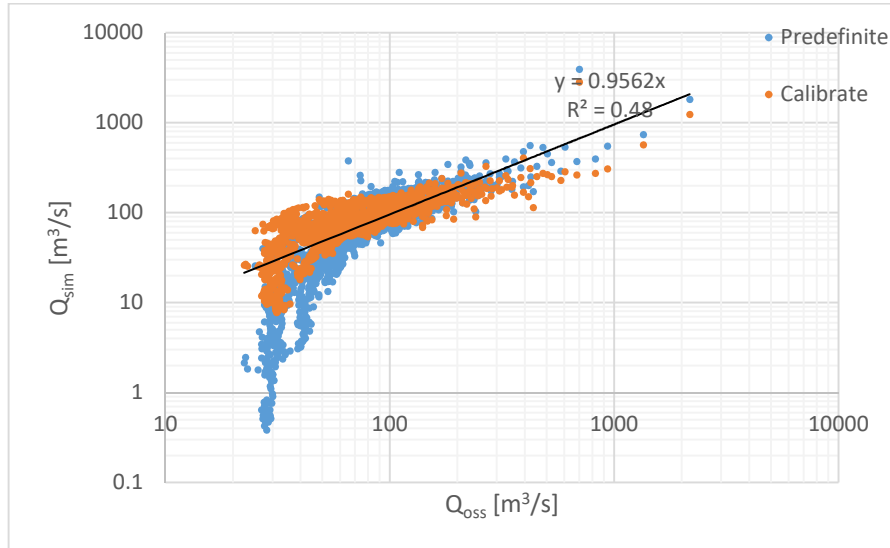
Idrologica,» Arpa Piemonte, [Online]. Available:
https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-idrologica.html

21. U. G. Survey, «USGS: Il ciclo dell'acqua,» [Online]. Available:
<https://water.usgs.gov/edu/watercycleitalian.html>
22. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, 50 (2007), pp. 885-900
23. Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. Z Duan, J Liu, Y Tuo, G Chiogna, M Disse. *Science of The Total Environment* 573, 1536-1553

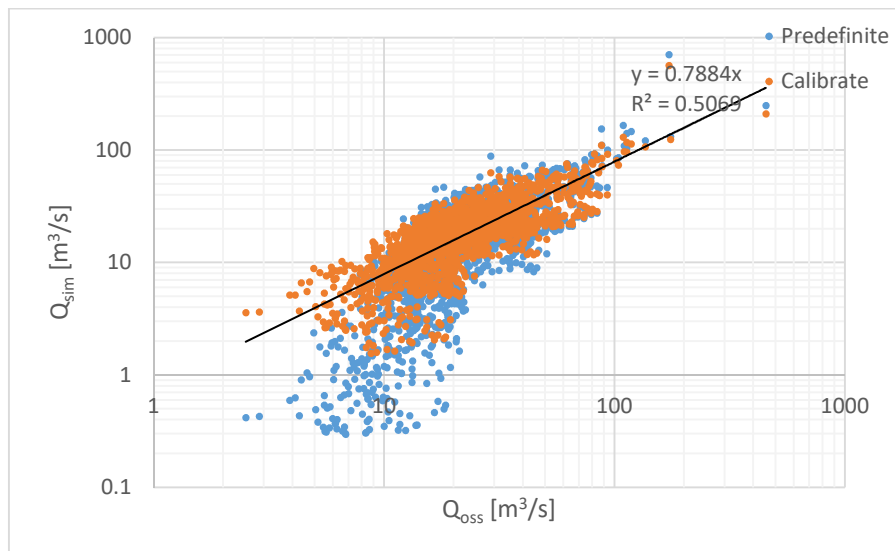
APPENDICE. Scatterplot dei deflussi nelle sezioni di confronto

In appendice sono riportati gli scatterplot dei deflussi nelle varie sezioni di confronto individuate per il periodo di validazione 2013/2017. In ascissa sono riportati le portate medie giornaliere osservate nelle varie stazioni di misura, in ordinata le corrispondenti simulate dal modello SWAT.

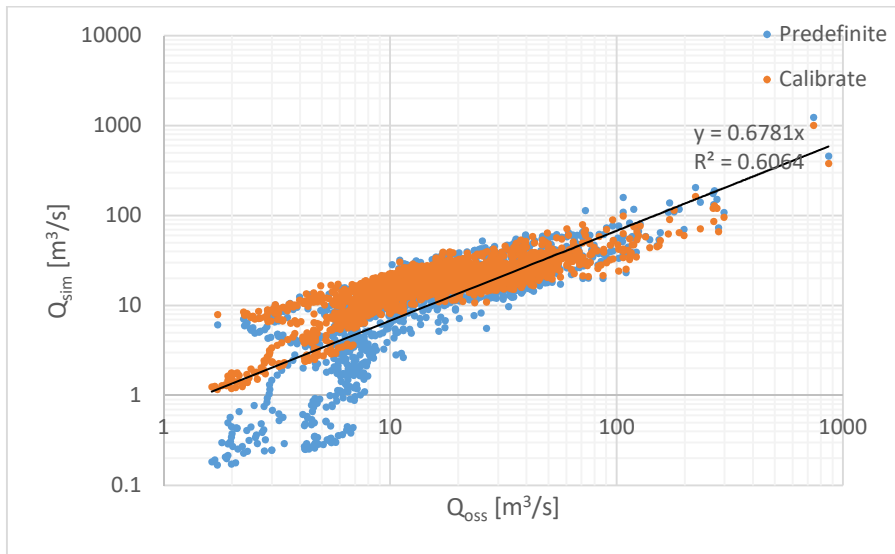
- Po a Torino Murazzi



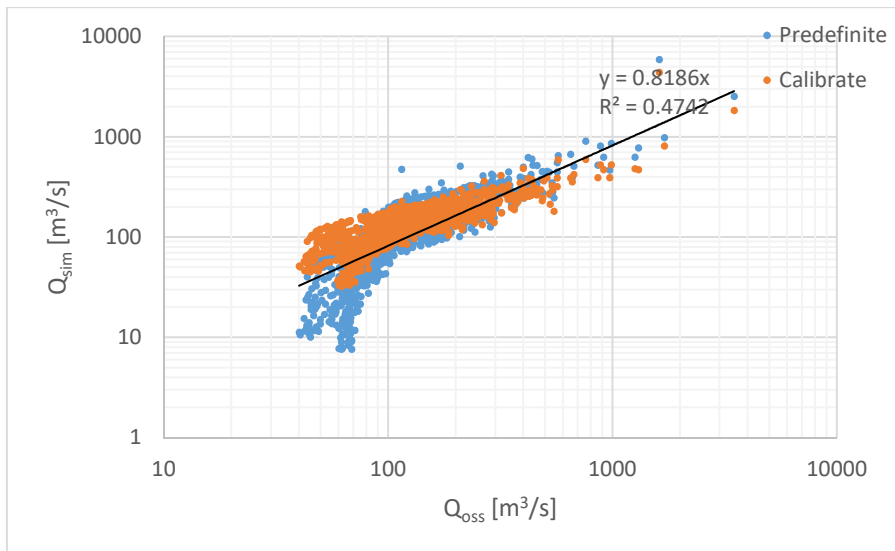
- Dora Riparia A Torino



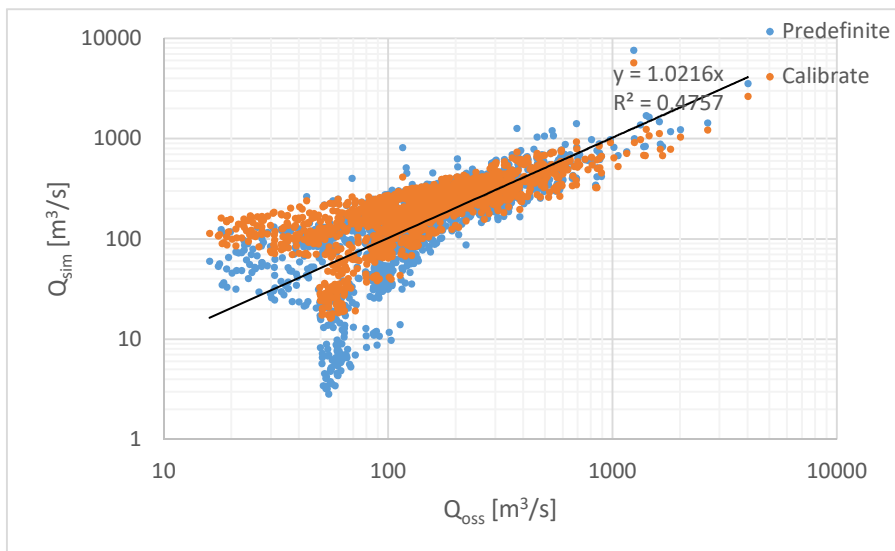
- Stura di Lanzo a Torino



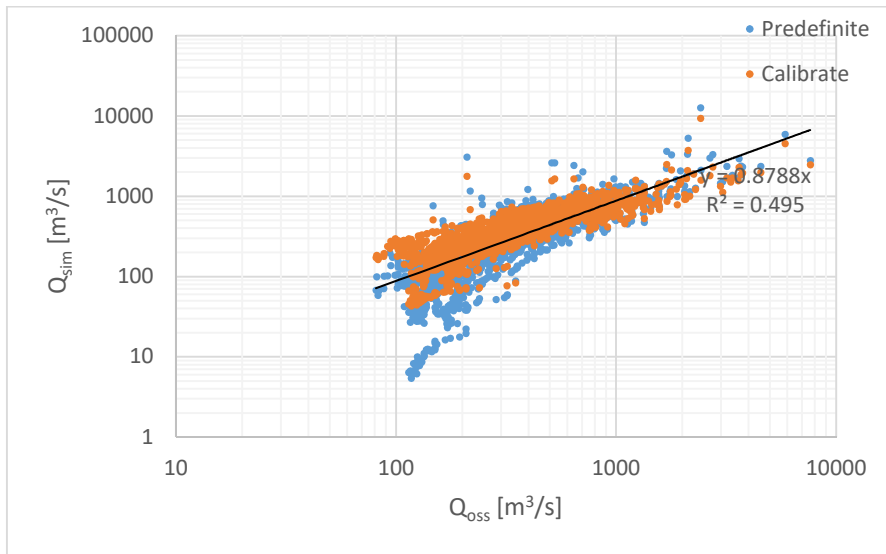
- Po a Castiglione Torinese



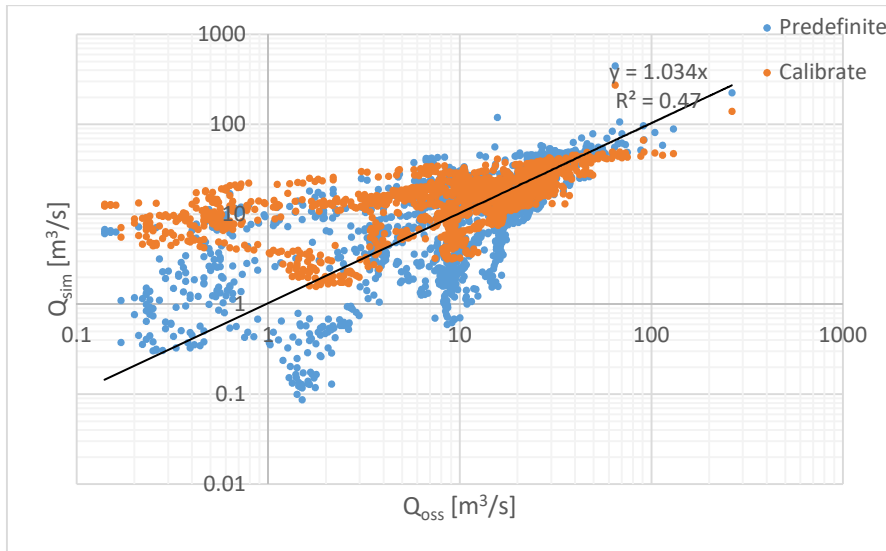
- Po a Casale Monferrato



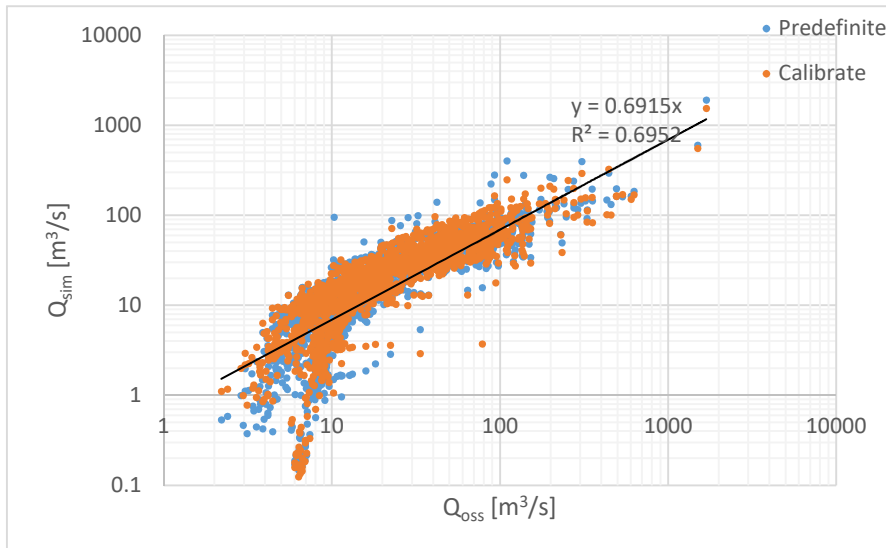
- Po ad Isola Sant' Antonio



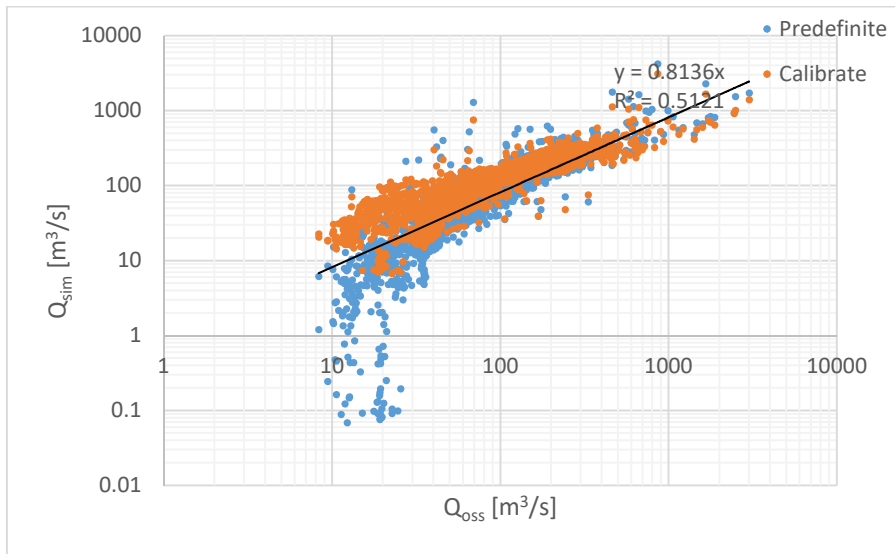
- Maira a Racconigi



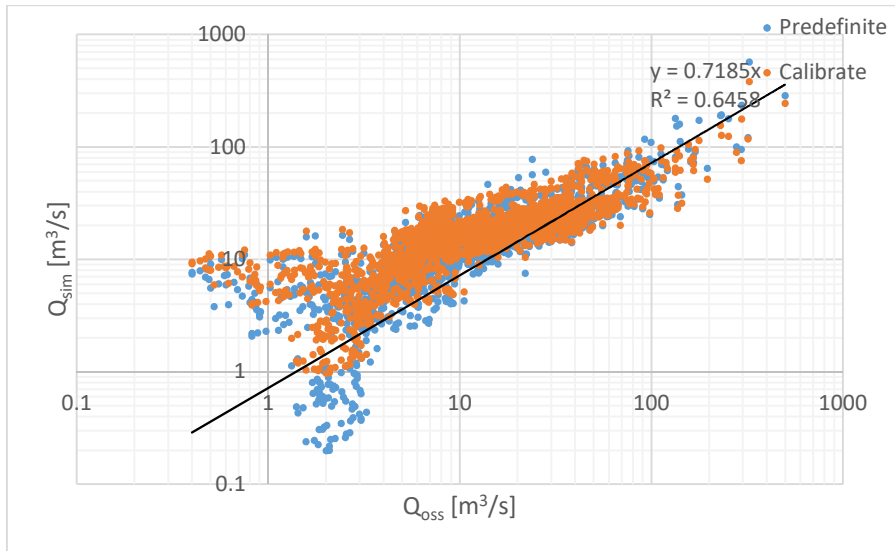
- Tanaro a Farigliano



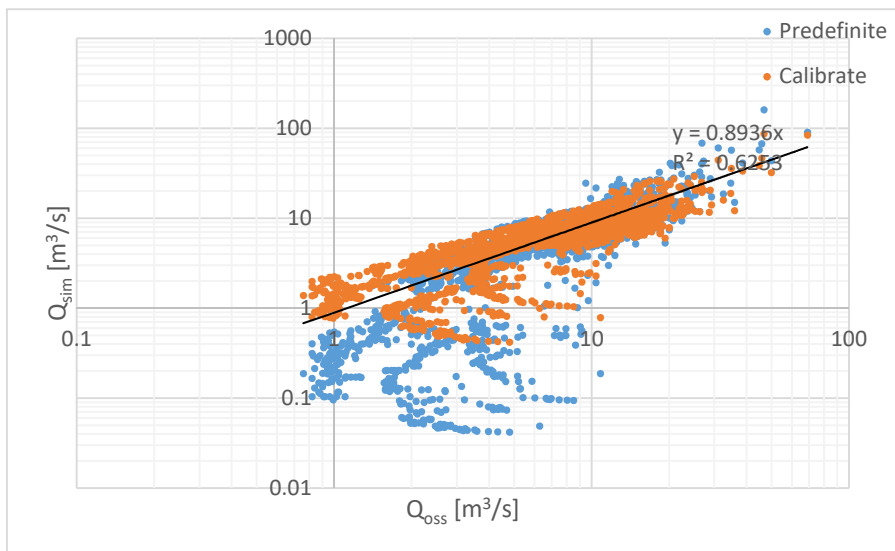
- Tanaro a Montecastello



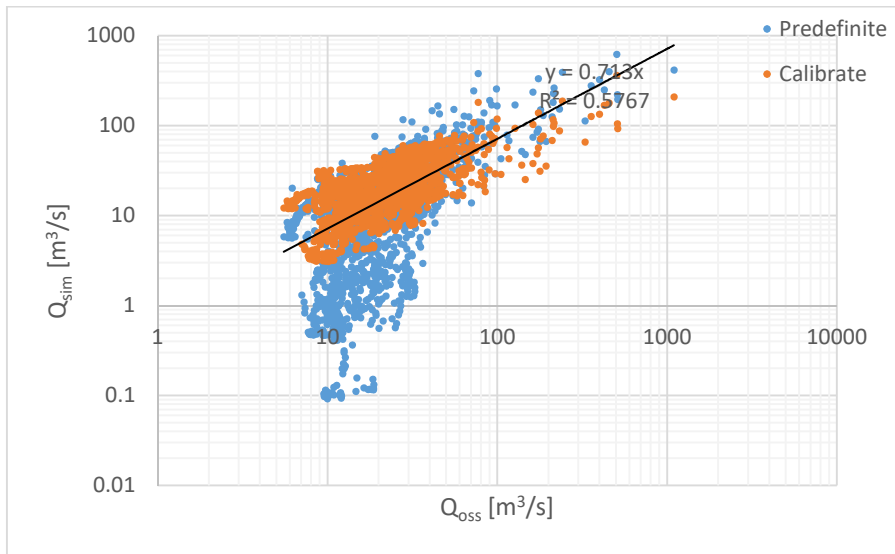
- Orco a San Benigno Canavese



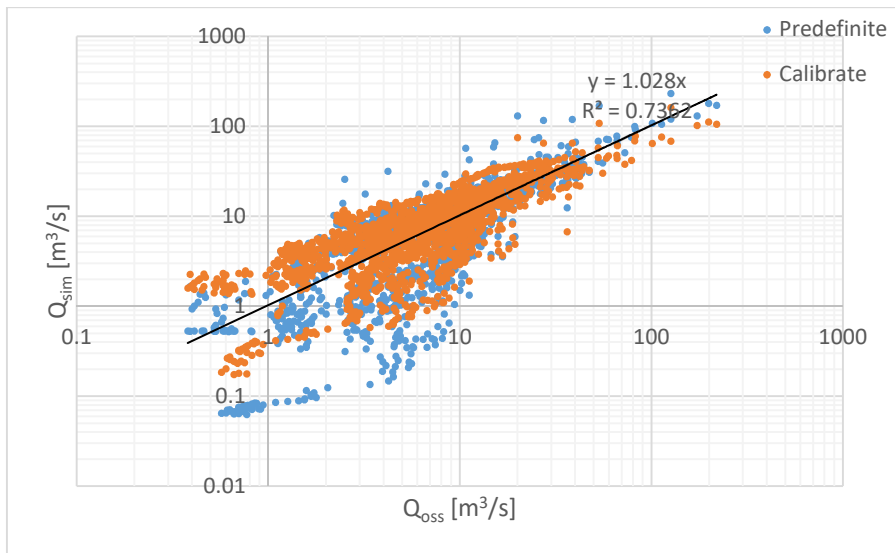
- Soana a Pont Canavese



- Cervo a Quinto Verellese



- Agogna a Novara



- Dora Baltea a Tavagnasco

