

POLITECNICO DI MILANO
I Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile-Idraulica



MODELLO MACROREGIONALE A PARAMETRI
ADIMENSIONALI DELLA CURVA DI DURATA
DELLE PORTATE – PICCOLI BACINI ALPINI E
APPENNINICI PADANO-VENETI

Relatore: Prof.ssa Priscila ESCOBAR ROJO

Tesi di Laurea di:
Andrea INVERNIZZI
Matr. n. 770868

Anno Accademico 2013-2014

Ringraziamenti

Desidero ringraziare la Professoressa Priscila Escobar Rojo per la disponibilità, la cortesia e la competenza dimostrate durante lo sviluppo di questo lavoro.

Un ringraziamento particolare al Professor Alberto Bianchi e al Professor Gianfranco Becciu per i preziosi consigli.

Ringrazio di cuore tutta la mia famiglia per essermi sempre stata vicina ed avermi sostenuto nel corso dei miei studi.

Voglio ringraziare i miei compagni di corso, i miei amici e tutti coloro che hanno contribuito a rendere più sereni questi anni di Università.

INDICE

Introduzione	Pag.	12
1 Richiami di statistica	Pag.	15
1.1 Variabili casuali: popolazione e campioni	Pag.	15
1.2 Probabilità	Pag.	16
1.3 Funzioni di probabilità e di densità di probabilità	Pag.	17
1.4 Principali grandezze statistiche campionarie	Pag.	18
1.5 Correlazione e regressione	Pag.	19
2 La regionalizzazione della curva di durata	Pag.	22
2.1 Curva di durata: definizione e costruzione	Pag.	22
2.2 Coefficiente di utilizzazione di un corso d'acqua	Pag.	25
2.3 Modelli	Pag.	28
2.4 Il processo di regionalizzazione	Pag.	28
2.5 Modelli regionali per la stima delle curve di durata	Pag.	29
2.6 Opportunità di un modello generale per l'arco alpino	Pag.	31

3 La distribuzione di Weibull a tre parametri	Pag. 32
3.1 Formulazione matematica e applicazione alle curve di durata	Pag. 32
3.2 Influenza dei parametri λ , ε e β sulle curve di durata	Pag. 35
4 Aree di indagine e principali risultati pregressi	Pag. 41
4.1 Lombardia	Pag. 41
4.2 Alpi occidentali e Appennino Ligure-Emiliano	Pag. 47
4.3 Trentino - Alto Adige e Veneto	Pag. 52
5 Analisi ed elaborazione dei dati	Pag. 56
5.1 Scelta dei dati	Pag. 56
5.2 Costruzione delle curve di durata	Pag. 62
5.3 Adimensionalizzazione delle portate misurate	Pag. 66
6 Sviluppo del modello	Pag. 71
6.1 Regionalizzazione dei parametri	Pag. 71
6.2 Analisi del parametro λ	Pag. 73
6.3 Analisi del parametro ε	Pag. 75
6.4 Analisi del parametro β	Pag. 76

6.5 Autocorrelazione tra λ e gli altri parametri	Pag. 77
6.6 Costruzione del modello	Pag. 80
7 Applicazione dei modelli e risultati	Pag. 84
7.1 Stima delle curve di durata medie	Pag. 84
7.2 Analisi dei volumi idrici	Pag. 87
7.3 Calcolo dei volumi utili	Pag. 94
7.4 Analisi di sensibilità del parametro β	Pag. 101
Conclusioni	Pag. 107
Appendice A: relazioni di regressione lineare e di potenza tra i parametri adimensionali λ , ε , $\lambda-\varepsilon$ e β e le principali grandezze geomorfologiche e climatiche dei bacini	Pag. 109
Appendice B: curve di durata medie osservate, calcolate mediante la tradizionale distribuzione di Weibull a tre parametri, e stimate con il MOD. 1	Pag. 120
Bibliografia	Pag. 146

INDICE FIGURE

Fig. 2.1 Esempio di curva di durata (bacino fluviale)	Pag.	23
Fig. 2.2 Esempio di curva di durata (bacino torrentizio)	Pag.	23
Fig. 2.3 Curva di durata e portate derivabili	Pag.	26
Fig. 3.1 Curve di durata secondo Weibull con $\varepsilon=0$ e $\beta=1$ al variare di λ	Pag.	36
Fig. 3.2 Curve di durata secondo Weibull con $\lambda=25$ e $\beta=1$ al variare di ε	Pag.	37
Fig. 3.3 Curve di durata secondo Weibull con $\lambda=25$ e $\varepsilon=0$ al variare di β	Pag.	38
Fig. 3.4 Curva di probabilità di Weibull per il fiume Adda a Tirano	Pag.	39
Fig. 3.5 Curva di probabilità di Weibull per il fiume Adda a Spino d'Adda	Pag.	39
Fig. 4.1 Sezioni idrografiche considerate nello studio iniziale condotto sui bacini lombardi	Pag.	42
Fig. 4.2 Andamento del parametro β in funzione della durata per i bacini dell'Adda a Tirano, del Venina a S. Venina e del Livrio a Crocetta	Pag.	44
Fig. 4.3 Bacini alpini, prealpini e appenninici – settore piemontese e ligure	Pag.	47
Fig. 4.4 Bacini appenninici – settore emiliano	Pag.	48
Fig. 4.5 Errori relativi rispetto ai volumi totali osservati per i bacini alpini e prealpini	Pag.	51
Fig. 4.6 Errori relativi rispetto ai volumi totali osservati per i bacini appenninici	Pag.	52
Fig. 4.7 Sezioni idrometriche considerate per i settori veneto e trentino	Pag.	53
Fig. 4.8 Errore relativo tra volume totale osservato e volume totale stimato attraverso il modello per l'area Adige-Brenta	Pag.	55
Fig. 4.9 Errore relativo tra volume totale osservato e volume totale stimato attraverso il modello per l'area Piave	Pag.	55
Fig. 5.1 Annale Idrologico della stazione di Brenta a Borgo Valsugana – Caratteristiche della stazione e portate medie giornaliere	Pag.	58
Fig. 5.2 Annale Idrologico della stazione di Brenta a Borgo Valsugana – Elementi caratteristici	Pag.	58

Fig. 5.3 Curva di durata media osservata del Chisone a San Martino	Pag.	63
Fig. 5.4 Confronto tra la curva di durata media osservata e stimata attraverso la formula di Weibull a tre parametri per la stazione di Chisone a San Martino	Pag.	66
Fig. 6.1 Relazione di potenza tra λ e la media adimensionale della curva di durata μ	Pag.	73
Fig. 6.2 Relazione di potenza tra λ e la quota media divisa per 1000	Pag.	74
Fig. 6.3 Relazione di potenza tra λ e il coefficiente di deflusso φ	Pag.	74
Fig. 6.4 Relazioni tra λ - ε e la quota media divisa per 1000	Pag.	75
Fig. 6.5 Relazioni tra λ - ε e il coefficiente di deflusso φ	Pag.	76
Fig. 6.6 Relazioni tra β e la quota media del bacino divisa per 1000	Pag.	76
Fig. 6.7 Relazioni tra λ - ε e λ	Pag.	77
Fig. 6.8 Relazioni tra β e λ	Pag.	77
Fig. 6.9 Relazione lineare tra λ - ε e $\lambda*\varphi$	Pag.	78
Fig. 6.10 Relazioni tra β e $\lambda*\varphi$	Pag.	78
Fig. 6.11 Relazione polinomiale quadratica tra β e λ/φ	Pag.	79
Fig. 6.12 Relazione polinomiale cubica tra β e λ/φ	Pag.	79
Fig. 6.13 Relazione di potenza tra il coefficiente di deflusso φ e il parametro λ	Pag.	80
Fig. 7.1 Curva di durata media osservata, calcolata (Weibull) e stimata (MOD. 1 e MOD. 2) del Cervo a Passobreve	Pag.	85
Fig. 7.2 Curva di durata media osservata, calcolata (Weibull) e stimata (MOD. 1 e MOD. 2) dell'Aveto a Cabanne	Pag.	85
Fig. 7.3 Curva di durata media osservata, calcolata (Weibull) e stimata (MOD. 1 e MOD. 2) dello Scodogna a Casa Nuova	Pag.	86
Fig. 7.4 Curva di durata media osservata, calcolata (Weibull) e stimata (MOD. 1 e MOD. 2) del Quaderna a Palesio	Pag.	87
Fig. 7.5 Relazione lineare tra i volumi totali annui stimati e osservati – MOD. 1	Pag.	88
Fig. 7.6 Relazione lineare tra i volumi totali annui stimati e osservati – MOD. 2	Pag.	88
Fig. 7.7 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Alpi Occidentali	Pag.	89
Fig. 7.8 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Appennini	Pag.	89
Fig. 7.9 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Adige e Brenta	Pag.	90
Fig. 7.10 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Piave	Pag.	90
Fig. 7.11 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di		

deflusso – Lombardia	Pag. 91
Fig. 7.12 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Istogramma globale	Pag. 93
Fig. 7.13 Confronto volumi utili stimati – volumi utili osservati (MOD 1)	Pag. 95
Fig. 7.14 Confronto volumi utili stimati – volumi utili osservati (MOD 2)	Pag. 95
Fig. 7.15 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Alpi Occidentali	Pag. 96
Fig. 7.16 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Appennini	Pag. 96
Fig. 7.17 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Adige e Brenta	Pag. 97
Fig. 7.18 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Piave	Pag. 97
Fig. 7.19 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Lombardia	Pag. 98
Fig. 7.20 Curve di durata osservate, calcolate e stimate del torrente Correcchio a Contrada “Il Portone”	Pag. 99
Fig. 7.21 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Istogramma globale	Pag. 100
Fig. 7.22 Errore relativo nella stima del volume totale al variare di β . Stazione di Cervo a Passobreve	Pag. 102
Fig. 7.23 Errore relativo nella stima del volume totale al variare di β . Stazione di Borbera a Baracche	Pag. 102
Fig. 7.24 Errore relativo nella stima del volume totale al variare di β . Stazione di Aurino a Caminata	Pag. 103
Fig. 7.25 Errore relativo nella stima del volume totale al variare di β . Stazione di Piave a Ponte Lasta	Pag. 103
Fig. 7.26 Errore relativo nella stima del volume totale al variare di β . Stazione di Chiese a Ponte Cimego	Pag. 104
Fig. 7.27 Curve di durata medie osservate, calcolate e stimate per il Borbera a Baracche	Pag. 104
Fig. 7.28 Curve di durata medie osservate, calcolate e stimate per il Borbera a Baracche (β imposto = 0,35)	Pag. 105
Fig. 7.29 Curve di durata medie osservate, calcolate e stimate per il Borbera a Baracche (β imposto = 1,02)	Pag. 105
Appendice A: da Fig 1 a Fig 20 : Relazioni di regressione lineare e di potenza tra i parametri adimensionali λ , ε , λ - ε e β e le principali grandezze geomorfologiche e climatiche dei bacini	da pag. 109 a pag. 119
Appendice B: da Fig 21 a Fig 70 : curve di durata medie osservate, calcolate mediante la tradizionale distribuzione di Weibull a tre parametri, e stimate con il MOD. 1	da pag. 120 a pag. 145

INDICE TABELLE

Tab. 3.1 Valori standard per i parametri λ , ε e β	Pag. 35
Tab. 4.1 Confronto tra i volumi medi annui defluiti osservati e stimati per i bacini Lombardi	Pag. 46
Tab. 5.1 Fonti dei dati	Pag. 60
Tab. 5.2 Principali grandezze caratteristiche dei bacini oggetto di studio	Pag. 62
Tab. 5.3 Curve di durata medie osservate: medie, deviazioni standard e coefficienti di asimmetria	Pag. 65
Tab. 5.4 Curve di durata medie osservate: medie, deviazioni standard e coefficienti di asimmetria adimensionali	Pag. 68
Tab.5.5 Parametri adimensionali della distribuzione di Weibull a tre parametri	Pag. 70
Tab. 6.1 Valori del coefficiente di correlazione lineare R^2 tra i valori di λ , ε , β e quelli delle principali caratteristiche geomorfologiche e climatiche dei bacini osservati.	Pag. 72
Tab. 6.2 Valori del coefficiente di correlazione di potenza R^2 tra i valori di λ , ε , β e quelli delle principali caratteristiche geomorfologiche e climatiche dei bacini osservati.	Pag. 72
Tab. 7.1 Errori medi percentuali per i due modelli	Pag. 91
Tab.7.2 Errori relativi medi riferiti alle singole zone e all'intera serie di bacini MOD. 1 e MOD. 2	Pag. 98

Abstract

La curva di durata delle portate rappresenta uno strumento di fondamentale importanza per la quantificazione della risorsa idrica disponibile all'interno di un bacino idrografico. Tale curva permette di visualizzare con facilità in che modo le portate sono distribuite nell'arco dell'anno in corrispondenza di una certa sezione di chiusura.

La costruzione della curva di durata delle portate richiede misure dirette e continuative della portata per un periodo di tempo quanto più lungo possibile. Misure di questo tipo sono raramente disponibili sul territorio, soprattutto per quanto riguarda i piccoli bacini.

Il processo di regionalizzazione sopperisce alla mancanza di misure dirette attraverso l'elaborazione statistico-probabilistica dei dati disponibili e l'analisi geo-morfo-climatologica del rispettivo territorio. Questo processo porta all'individuazione di zone geografiche omogenee dal punto di vista climatico e geomorfologico dove il processo di trasformazione degli afflussi in deflussi è governato dalle stesse grandezze. Il procedimento prevede la scelta di un modello probabilistico per la riproduzione delle curve di durata osservate e la successiva individuazione di relazioni tra i parametri che definiscono la distribuzione e alcune grandezze geomorfologiche e climatiche dei bacini considerati. Grazie a queste relazioni è possibile costruire sinteticamente la curva di durata delle portate in bacini non monitorati appartenenti alla medesima area omogenea precedentemente individuata.

In questo elaborato vengono ripresi alcuni modelli regionali recentemente sviluppati per cinque zone omogenee del Nord Italia e viene proposto un unico modello "macroregionale" basato sui risultati precedenti rielaborati tramite l'adimensionalizzazione di tutte le grandezze che governano il fenomeno. Inoltre, attraverso l'analisi dei volumi medi annui di deflusso, si dimostra che le curve di durata ottenute con il modello qui proposto, risultano più attendibili rispetto a quelle ottenute con i precedenti modelli.

Abstract

Flow duration curves represent a fundamental tool for the evaluation of water resources within a hydrographic basin. These curves allow an easy understanding of how discharges are distributed during the year at a certain closure section of a catchment.

The construction of flow duration curves requires direct and continuous discharge measurements over long periods. Such records are available only in large catchments while there's a complete lack of them in small-untapped basins.

In order to deal with this lack, regionalization models of the run-off process have been developed. These models are based on the analysis of direct stream-flow measurements of several basins chosen within the same geographic area, characterized by a climatic and geomorphologic homogeneity. Normally, the regionalization procedure approximates the observed flow data to a probabilistic distribution; thenceforth, the relations between the basic parameters that define the probabilistic distribution and the main geomorphologic and climatic magnitudes that govern the phenomena are identified. The obtained relations allow the estimation of flow duration curves in untapped basins of the same homogeneous area.

Herein, former results obtained for five different homogeneous areas in North Italy are discussed and analyzed by using dimensionless criteria. Therefore, a single "macroregional" model suitable for the whole area is proposed. This general model highlights the relation between the run-off process and some of the geo-morpho-climatic characteristics of the single basin and supplies synthetic duration curves with better accuracy than the former models.

Introduzione

La conoscenza della disponibilità idrica in una data regione rappresenta da sempre un'informazione fondamentale per poter pianificare e programmare gli sviluppi economici e sociali.

L'evoluzione scientifica e tecnologica che ha caratterizzato, in maniera crescente, gli ultimi due secoli, ha determinato uno sviluppo industriale e demografico senza precedenti e, di conseguenza, un bisogno sempre maggiore di acqua per usi tra loro molto diversi: civili, industriali, energetici, irrigui, ricreativi, ecc.

Negli ultimi anni è maturata la consapevolezza che la risorsa idrica, oltre a non essere distribuita uniformemente sul territorio, non è sicuramente illimitata, basti pensare che l'acqua dolce rappresenta soltanto il 2,5% dell'intera risorsa disponibile a livello globale. L'acqua deve essere quindi adeguatamente salvaguardata: è necessario ottimizzare l'utilizzo della risorsa idrica riducendo gli sprechi e inoltre bisogna fare in modo che la risorsa idrica non si deteriori a causa degli agenti inquinanti. Ciò comporta la ricerca e lo studio di un utilizzo sostenibile delle acque fondato sulla protezione a lungo termine della risorsa attualmente disponibile.

Da questa situazione nasce la necessità di quantificare, nel modo più accurato possibile, la risorsa idrica disponibile all'interno dei bacini idrografici.

Considerando un bacino a una data sezione di chiusura, la soluzione più immediata per la stima della risorsa idrica disponibile in termini di deflusso superficiale è ovviamente la misura diretta delle portate idriche nella sezione considerata. Disponendo di una serie di dati storica relativa alle portate medie giornaliere è possibile costruire la curva di durata media delle portate per il bacino oggetto di studio. Tale curva permette di visualizzare con semplicità come sono distribuite in media le portate nell'arco di un anno poiché riporta in ordinata la portata media specifica [$l/(s \cdot km^2)$] e in ascissa la durata corrispondente in giorni (ovvero il numero di giorni per cui tale portata specifica risulta eguagliata o superata). L'area sottesa dalla curva di durata rappresenta inoltre il volume medio annuo di deflusso.

Un'analisi di questo tipo porta a risultati tanto più affidabili quanto più è lunga la serie storica dei dati misurati. Se a queste misure si associano misure idrologiche di precipitazione liquida e solida, misure di tipo glaciologico, misure del regime sotterraneo delle acque e valutazioni dell'entità dell'evapotraspirazione, si ottengono tutti i dati necessari per eseguire un corretto calcolo del bilancio idrologico all'interno del bacino considerato.

La risoluzione dell'equazione del bilancio idrologico permette di valutare il comportamento della risorsa idrica a partire da tutti i fenomeni fisici che caratterizzano il ciclo idrologico. Tale approccio rappresenta pertanto la strada migliore per stimare la disponibilità effettiva di acqua all'interno del bacino.

Purtroppo la situazione descritta si presenta in pochissime occasioni, in quanto le misure dell'altezza di precipitazione possono essere effettuate con facilità attraverso i pluviometri, ma lo stesso non si può affermare per l'evapotraspirazione e nemmeno per i deflussi idrici sotterranei. In questi casi, infatti, non è possibile effettuare una misura diretta di queste grandezze e bisogna quindi ricorrere a dei modelli per poterle stimare.

La complessità di tali modelli e la molteplicità delle variabili che entrano in gioco con questa metodologia ne limitano l'applicazione soltanto all'interno di piccoli bacini sperimentali fortemente monitorati.

Un buon compromesso può essere l'utilizzo delle sole misure di portata e di precipitazione che permette comunque una stima apprezzabile del regime idrologico all'interno del bacino. Questa situazione si va sempre più diffondendo grazie allo sviluppo della rete di misura delle portate idriche e anche grazie allo sviluppo di nuovi sistemi di acquisizione dei dati.

Nei paesi più sviluppati il reticolo idrografico principale è dotato di un sistema di monitoraggio idrometrico particolarmente diffuso. In contrasto il reticolo minore, costituito dai piccoli bacini prevalentemente montani molto spesso non ancora sfruttati, risulta nella maggioranza dei casi privo di sistemi di monitoraggio delle portate idriche; la possibilità di poter pianificare uno sfruttamento sostenibile di tali bacini è pertanto pesantemente compromessa.

La necessità dello sfruttamento idrico di piccoli bacini non monitorati pone quindi alcune problematiche. Innanzitutto, essendo la richiesta idrica prevalentemente immediata, non è possibile attendere molti anni per avere una serie storica di misure di portata che permetta una valutazione corretta della risorsa mediamente disponibile. In secondo luogo, l'installazione di una rete di misura idrometrica su questi bacini comporterebbe costi non indifferenti e la necessità di una costante manutenzione anche in luoghi spesso difficili da raggiungere.

Di fronte a questa situazione una valida alternativa per la stima della risorsa idrica è data dal metodo di regionalizzazione, che sopperisce alla mancanza di misure dirette della variabile

idrologica all'interno del bacino andando a utilizzare misure presenti in bacini limitrofi o comunque dotati di una certa affinità dal punto di vista idrologico. Si possono, infatti, individuare delle regioni in cui i bacini, viste le affinità per caratteristiche climatiche, geologiche e morfologiche, godono di un regime idrologico molto simile. Avendo a disposizione un numero più grande possibile di bacini monitorati appartenenti a una zona omogenea si cerca poi di individuare delle relazioni tra le curve di durata medie osservate e alcune grandezze geomorfologiche e idrologiche generalmente facili da reperire anche per bacini non monitorati. Tra queste grandezze sono spesso utilizzate la quota media, l'estensione, l'inclinazione media e la piovosità media annua del bacino. Nel caso in cui le relazioni di regressione tra questi parametri e le curve di durata osservate risultino particolarmente significative è allora possibile sviluppare un modello regionale grazie al quale si riesce a stimare con buona approssimazione le curve di durata medie di bacini non monitorati.

I modelli di regionalizzazione della curva di durata delle portate sono stati sviluppati in molti paesi del mondo a partire dagli anni '80 e rappresentano tuttora uno strumento molto utile e di facile applicazione per la stima delle risorse idriche all'interno di bacini privi di monitoraggio idrometrico.

Il territorio alpino e prealpino italiano è stato oggetto di numerosi studi di questo tipo. In particolare, il Politecnico di Milano nel 1997 ha realizzato uno studio sui corsi d'acqua alpini e prealpini della Lombardia nel quale è stato costruito, in base alla distribuzione di Weibull a tre parametri (λ , ϵ e β), un modello regionalizzato per la stima delle curve di durata delle portate che la Regione Lombardia ha poi adottato come normativa di riferimento.

Sulla base di questo studio all'interno di alcune tesi di laurea del Politecnico di Milano sono stati sviluppati dei modelli di regionalizzazione simili applicabili a piccoli bacini non soggetti a regolazione situati all'interno delle seguenti zone geografiche: Appennino Ligure-Emiliano, Alpi Occidentali, bacino dell'Adige e del Brenta, bacino del Piave.

I risultati forniti da questi cinque modelli sono particolarmente precisi; tuttavia bisogna ricordare che, secondo il principio della regionalizzazione, ognuno di questi modelli è valido soltanto all'interno della particolare zona geo-morfo-climatica cui fa riferimento.

Lo scopo di questo elaborato è quello di analizzare nuovamente i dati considerati per lo sviluppo dei cinque modelli sopracitati e di valutare la possibilità di sviluppare un unico modello "macroregionale" applicabile con buona approssimazione in tutte le cinque zone operando un'opportuna omogeneizzazione dei dati idrometrici di partenza secondo una procedura di adimensionalizzazione.

Richiami di statistica

Prima di raccogliere ed elaborare dati relativi a qualsiasi tipologia di fenomeno è necessario conoscere i fondamenti della statistica e tutte quelle nozioni che permettono di mettere in atto le procedure di calcolo utili allo scopo prefissato. Il presente capitolo richiama le principali nozioni di statistica.

1.1 Variabili casuali: popolazione e campioni

Una variabile viene definita *casuale* quando assume valori che dipendono da un numero molto elevato di cause spesso sconosciute oppure solo parzialmente note. L'altezza di pioggia caduta in un punto generico di una regione è una variabile *casuale e continua*: *casuale* in quanto è il risultato di molteplici processi meteorologici non tutti chiaramente individuabili, e *continua* perché può assumere qualunque valore positivo o nullo.

Il numero di giorni piovosi in un anno è, invece, un esempio di variabile casuale *discreta*, poiché essa può assumere solo alcuni valori, ovvero tutti i numeri interi positivi compresi tra 0 e 365. Inoltre tale variabile risulta limitata superiormente con valore massimo pari a 365.

Per *popolazione* di una variabile casuale x , si intende l'insieme degli infiniti valori che x può assumere (non necessariamente distinti tra di loro). Un esempio di popolazione è quella costituita da tutti i valori di portata media giornaliera misurata per un numero indefinitamente lungo di anni in una generica sezione di un corso d'acqua purché nell'alveo o nel bacino idrografico non siano stati effettuati interventi antropici capaci di modificare il regime idrologico. Nel caso in cui siano stati eseguiti dei lavori per esempio per la realizzazione di un serbatoio artificiale, i valori della variabile

in esame apparterranno a due differenti popolazioni: l'insieme dei valori misurati *prima* e *dopo* la realizzazione dell'opera.

Per *campione* di dimensione N , estratto dalla popolazione della variabile casuale x , si intende una qualsiasi *serie finita* di N elementi estratta dalla popolazione della x . Il campione deve avere caratteristiche di *omogeneità* e di *rappresentatività*, cioè deve essere estratto da un'unica popolazione e deve contenere tutte le informazioni che permettano di risalire alle caratteristiche della popolazione.

Per una variabile casuale continua x si introduce la funzione di probabilità $P(x)$ che associa a ogni valore di x la probabilità che la variabile assuma un valore minore o uguale a x (probabilità di non superamento). La derivata della funzione $P(x)$ si chiama *densità di probabilità* $p(x)$; il differenziale della funzione di probabilità $dP(x) = p(x)dx$ è una misura della probabilità che ha la variabile di assumere un valore compreso tra x e $x+dx$.

L'integrale esteso tra $-\infty$ e $+\infty$ della densità di probabilità, misura la probabilità che la variabile assuma un qualunque valore nell'intervallo $[-\infty, +\infty]$ ed è pari all'unità (probabilità di un evento certo).

1.2 Probabilità

Per *probabilità* di un evento E si intende il rapporto (che si indica con p) tra il numero m dei casi favorevoli a E e il numero totale n dei casi possibili.

$$p = \frac{m}{n} \quad (1.1)$$

Per esempio, la probabilità di ottenere un numero superiore a quattro gettando un dado da gioco con sei facce è la seguente:

$$p = \frac{2}{6} \quad (1.2)$$

1.3 Funzioni di probabilità e di densità di probabilità

In campo idrologico si possono trovare sia variabili discrete sia variabili continue. Tali variabili possono essere limitate o illimitate.

Nel caso di una variabile discreta il concetto di probabilità di un valore non presenta particolari difficoltà: a ciascun valore si può associare, infatti, immediatamente una probabilità.

La funzione $p(x)$, che associa a ogni valore della variabile casuale x la probabilità corrispondente, si chiama *funzione di probabilità* di x . La somma delle probabilità di tutti i valori possibili (indipendentemente dall'essere il numero di questi finito o infinito) deve essere uguale a uno, essendo certo che il valore effettivamente assunto dalla variabile deve risultare compreso tra quelli possibili.

Per quanto riguarda le variabili continue non è possibile assegnare valori finiti e non nulli alle probabilità nel rispetto della condizione che la somma delle probabilità di tutti i valori possibili sia uguale a uno. Pertanto in questi casi si parla di probabilità che la variabile assuma un valore assegnato in un certo intervallo.

Si introduce allora la funzione $P(x)$ che dà, per ogni x , la probabilità che la variabile casuale assuma un valore non superiore a x (probabilità di non superamento). Questa funzione prende il nome di *funzione di probabilità di non superamento* o più semplicemente *funzione di probabilità cumulata* (o anche *funzione di ripartizione*) della variabile casuale.

Naturalmente la definizione di probabilità di non superamento $P(x)$ vale anche per le distribuzioni di variabili discrete. In questo caso la $P(x)$ è una funzione discreta.

Considerando ancora il caso di variabile continua, osserviamo che il differenziale

$$dP(x) = p(x)dx \quad (1.3)$$

misura la probabilità che la variabile assuma un valore compreso nell'intervallo infinitesimo $(x, x+dx)$. La derivata $p(x)$ della funzione di probabilità cumulata prende il nome di *densità di probabilità*.

Poiché la probabilità che la variabile x assuma un qualsiasi valore compreso nell'intervallo $(-\infty, +\infty)$ è pari a uno (evento certo), deve risultare quanto segue:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1 \quad (1.4)$$

Quindi l'area sottesa dalla curva che rappresenta la densità di probabilità è sempre uguale a uno, qualunque sia il tipo di distribuzione.

1.4 Principali grandezze statistiche campionarie

Considerando una serie di N valori assunti dalla variabile idrologica x , ad esempio l'altezza di precipitazione in mm, si definisce *media aritmetica* x_m degli N valori (x_1, x_2, \dots, x_N) la seguente quantità:

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (1.5)$$

La media rappresenta il valore *centrale* della serie, attorno al quale i dati tendono ad addensarsi.

La mediana \bar{x} di una serie di N valori assunti dalla variabile idrologica x ordinatamente disposti (in senso crescente o decrescente) rappresenta il valore corrispondente a una frequenza di accadimento pari a 0,5 (il 50% dei valori della serie sono minori di \bar{x} e il 50% sono maggiori di \bar{x}).

La moda \check{x} rappresenta invece il valore che ricorre con maggior frequenza.

Oltre ai valori di media, mediana e moda, per caratterizzare un campione è necessario conoscere anche una misura della dispersione dei valori attorno alla media. Un parametro impiegato a tale scopo è la *varianza* σ^2 o la sua radice quadrata σ che viene denominata *scarto quadratico medio* oppure *deviazione standard*.

La varianza di una serie di N valori x_1, x_2, \dots, x_N si esprime come:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2}{N - 1} \quad (1.6)$$

Media, mediana, moda e scarto quadratico medio sono grandezze statistiche che hanno la stessa dimensione della grandezza originaria x (per esempio mm se con x si intende l'altezza di pioggia espressa in mm).

Il rapporto tra lo scarto quadratico medio e la media x_m si chiama *coefficiente di variazione CV* ed è, pertanto, un numero adimensionale.

Il *momento di ordine r* rispetto alla media di una serie di N valori x_1, x_2, \dots, x_N si può definire nel seguente modo:

$$m_r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^r}{N} \quad (1.7)$$

Per le serie storiche dei valori estremi assume particolare importanza il *coefficiente di asimmetria* γ , esprimibile come:

$$\gamma = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} = N^{1/2} \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^3}{[\sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2]^{3/2}} \quad (1.8)$$

L'asimmetria è un indice di forma della distribuzione di probabilità:

- per $\gamma = 0$ la funzione densità di probabilità $p(x)$ è simmetrica;
- per $\gamma > 0$ la funzione densità di probabilità presenta una coda per i valori più elevati della variabile x e si dice *inclinata a destra*;
- per $\gamma < 0$ la suddetta distribuzione ha una coda per i valori più piccoli di x e si dice *inclinata a sinistra*.

1.5 Correlazione e regressione

Consideriamo due variabili casuali x e y , tali che ad ogni valore della x corrisponda uno o più valori della y e viceversa a più valori della x corrisponda lo stesso y . Tra le due variabili così definite non esiste un legame di tipo funzionale ma può esistere un legame di tipo statistico.

Per determinare il suddetto legame si fa ricorso alla teoria della *correlazione*. Se tra le variabili casuali x e y esiste anche una dipendenza causa-effetto (per esempio, ad una fissata scala temporale, evento, giorno, etc., x è l'afflusso relativo ad un certo bacino idrografico e y è il corrispondente deflusso) il legame statistico esistente tra la variabile dipendente y e la variabile indipendente x viene denominato *regressione*.

Consideriamo due variabili casuali x e y delle quali generalmente si dispone di un campione costituito da N coppie di valori $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$, assunte in N occasioni distinte e tra loro indipendenti. Successivamente disponiamo in un piano cartesiano, avente in ascissa la x e in ordinata la y , i punti che rappresentano le N coppie di valori. Se tra i punti (x_i, y_i) non esiste alcuna correlazione allora essi risulteranno dispersi nel piano cartesiano con un tipico andamento “a nuvola”. Se invece tra le due variabili esiste una qualche correlazione i punti si addenseranno su una fascia più o meno ristretta in relazione alla bontà della correlazione tra le due variabili. La

correlazione tra la variabile x e la variabile y si dice *positiva* se y cresce al crescere di x , si dice invece *negativa* se y decresce al crescere di x .

Per quantificare la bontà della legge di correlazione $y = f(x)$ prescelta si utilizzano degli opportuni indici statistici. Si definisce *devianza totale SST* la quantità:

$$SST = \sum_{i=1}^N (y_i - y_m)^2 \quad (1.9)$$

avendo indicato con y_m la media aritmetica delle N ordinate y_i . La devianza totale esprime l'effettiva variabilità dei valori y_i attorno alla loro media y_m .

La *devianza spiegata SSR* dall'equazione di correlazione ha invece la seguente espressione:

$$SSR = \sum_{i=1}^N (y_{i,c} - y_m)^2 \quad (1.10)$$

in cui $y_{i,c}$ è l'ordinata calcolata mediante l'equazione di correlazione in corrispondenza della generica ascissa x_i . La devianza spiegata esprime, quindi, la variabilità delle y calcolate con l'equazione di correlazione attorno alla media y_m dei valori campionari.

Si utilizza infine la *devianza dei residui SSE* avente la seguente espressione:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - y_{i,c})^2 \quad (1.11)$$

Poiché le differenze $(y_i - y_{i,c})$, denominate *residui*, esprimono la distanza, misurata lungo la direzione dell'asse y , tra i punti e l'equazione di correlazione, evidentemente la correlazione sarà tanto migliore quanto più piccola sarà la devianza *SSE*. La situazione limite è quella a devianza *SSE* nulla, circostanza che accade se per ogni x_i risulta $y_i = y_{i,c}$. cioè se tutti i punti ricadono proprio sulla curva rappresentativa dell'equazione di correlazione.

Se il modello di correlazione è lineare:

$$y = b_0 + b_1 x \quad (1.12)$$

con b_0 e b_1 coefficienti, si dimostra che tra le diverse devianze sussiste la seguente relazione:

$$SST = SSR + SSE \quad (1.13)$$

Un indice molto usato per esprimere la bontà della correlazione è il *coefficiente di correlazione* R così definito:

$$R = \sqrt{\frac{SSR}{SST}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{i,c} - y_m)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - y_m)^2}} \quad (1.14)$$

Ovviamente se per ogni x_i risulta $y_i = y_{i,c}$, cioè se i punti appartengono proprio alla curva rappresentativa dell'equazione di correlazione, allora il coefficiente di correlazione assume il valore unitario.

Assieme al coefficiente di correlazione è opportuno però usare anche un indice che quantifichi l'incidenza dell'errore che si commette nella stima. Molto usato nelle applicazioni è la *varianza dei residui* MSE (acronimo di *mean square error*) che ha la seguente espressione:

$$MSE = \frac{SSE}{N - V - 1} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{i,c})^2}{N - V - 1} \quad (1.15)$$

avendo indicato con V il numero di variabili indipendenti presenti nel modello. Ovviamente la correlazione sarà tanto migliore quanto più ridotta sarà la varianza dei residui.

La regionalizzazione della curva di durata

In questo capitolo viene illustrato il concetto di curva di durata delle portate sottolineando l'importanza del suo utilizzo per la valutazione della risorsa idrica. Si discute in seguito sulla possibile stima della curva all'interno di bacini non monitorati attraverso i modelli di regionalizzazione.

2.1 Curva di durata: definizione e costruzione

Un modo particolarmente utile al fine di ottenere informazioni sulle caratteristiche di un corso d'acqua è quello di tracciare la curva di durata delle portate ad una certa sezione di chiusura del bacino.

La curva di durata è una curva decrescente che riporta in ordinata i valori di portata media giornaliera (solitamente espressi in termini di portata specifica [$l/(s \cdot km^2)$]) e in ascissa la durate corrispondenti, ovvero il numero di giorni, non necessariamente consecutivi, per i quali una data portata viene eguagliata o superata. Solitamente come periodo di riferimento si sceglie un tempo pari a un anno, quindi, il valore minimo di portata corrisponde alla portata eguagliata o superata 365 giorni all'anno, mentre la portata in corrispondenza dell'ascissa "1 giorno" rappresenta il valore massimo annuale della portata media giornaliera.

Si può dire quindi che una curva di durata rappresenta una funzione di distribuzione di probabilità di superamento della portata media giornaliera.

L'integrale della curva di durata delle portate rappresenta invece il volume totale d'acqua transitante nel corso di un anno per la sezione di chiusura considerata.

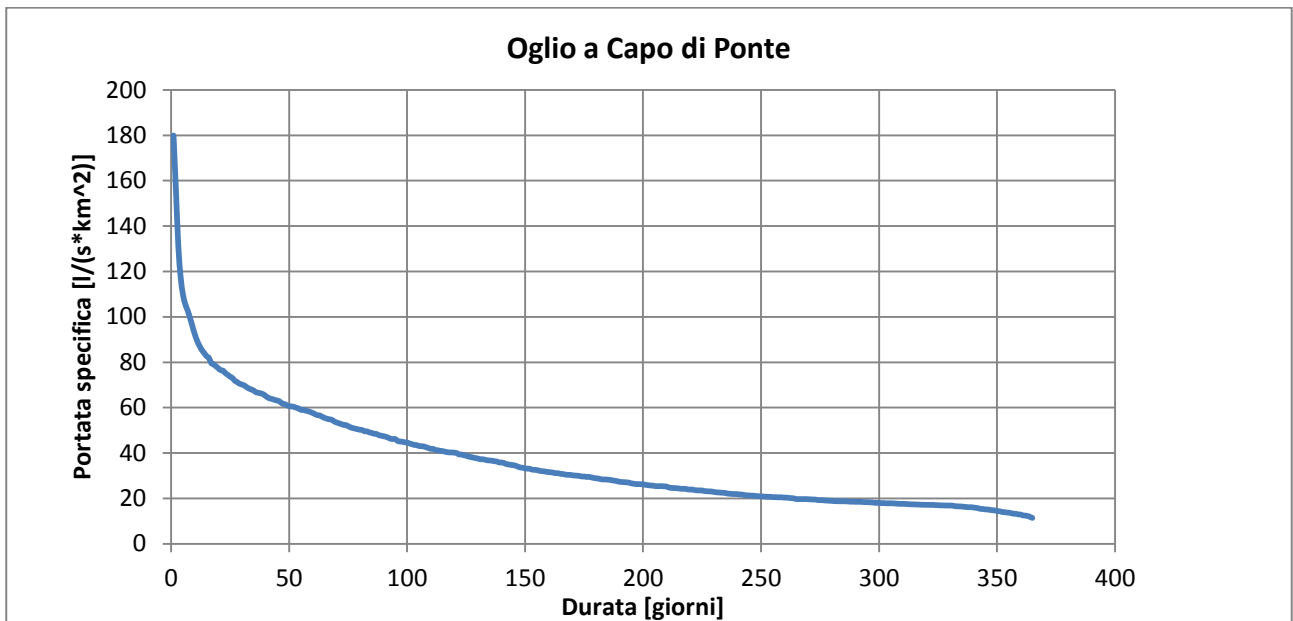


Fig. 2.1 Esempio di curva di durata (bacino fluviale)

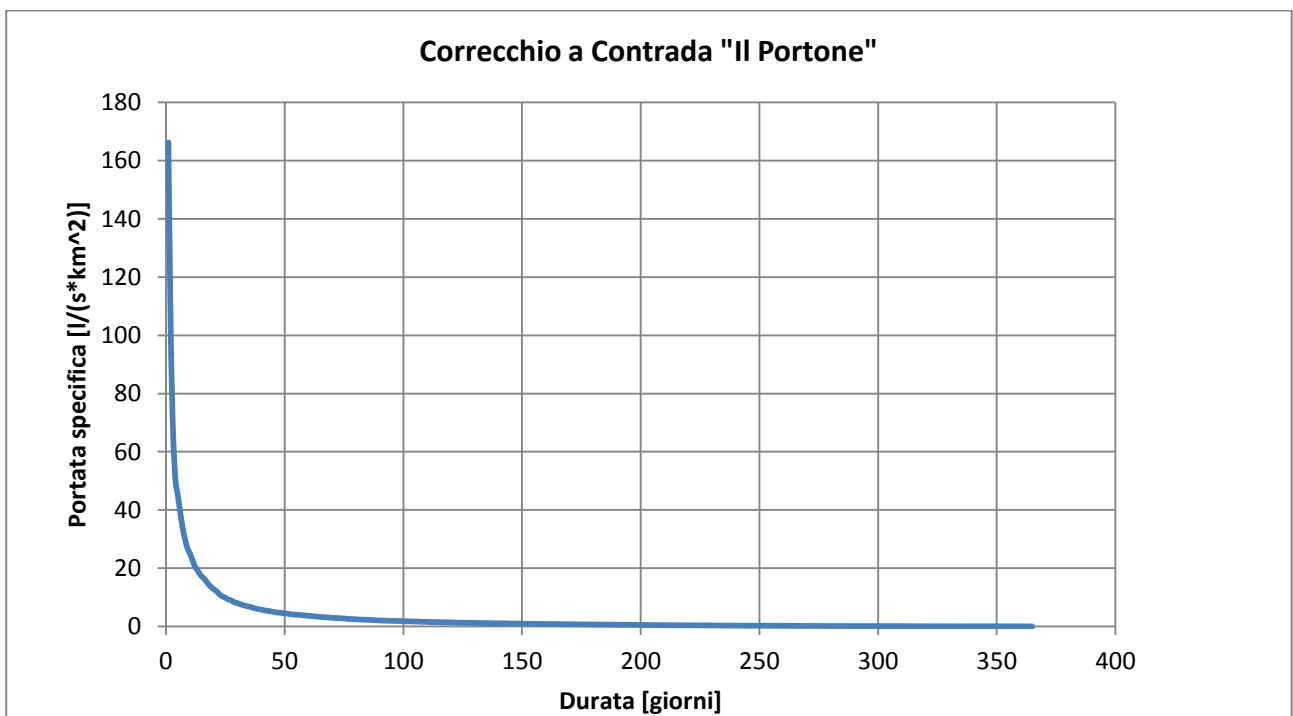


Fig. 2.2 Esempio di curva di durata (bacino torrentizio)

Dall'osservazione della curva si possono desumere varie informazioni riguardanti il corso d'acqua e il bacino idrografico sotteso:

- Una curva avente portate minime nulle indica che il corso d'acqua considerato è soggetto ad un regime idrologico di tipo torrentizio.
- La pendenza dell'estremità superiore della curva è legata al clima della regione e all'entità degli eventi meteorici intensi che agiscono sul bacino: una pendenza scarsa si ha per bacini in cui la maggior parte degli eventi di piena sono causati dallo scioglimento nivale oppure per grandi bacini fluviali in cui gli eventi di piena più rilevanti si hanno in corrispondenza di piogge prolungate nel tempo. Al contrario un'estremità superiore particolarmente ripida è associabile a piccoli bacini a carattere impulsivo per i quali gli eventi di piena sono prevalentemente legati a precipitazioni intense e di breve durata.
- La pendenza dell'estremità inferiore della curva dipende invece soprattutto dalle caratteristiche geologiche e dalla presenza di corpi idrici sotterranei all'interno del bacino: una scarsa pendenza indica solitamente che la ricarica da parte delle falde acquifere è notevole e continua anche nei periodi siccitosi. Una forte pendenza nel tratto terminale è tipica al contrario di bacini che non possono contare su un costante contributo idrico derivante dalle falde.
- La curva può dare informazioni anche sul tipo di suolo: una curva complessivamente ripida si può associare a suoli prevalentemente impermeabili che, limitando fortemente l'infiltrazione, impediscono la ricarica delle falde e favoriscono al contrario la formazione di eventi di piena molto rilevanti in presenza di precipitazioni intense. A bacini caratterizzati da suoli molto permeabili invece corrispondono in genere curve di durata meno ripide.
- Le curve di durata naturali subiscono infine delle modifiche sostanziali se all'interno del bacino vengono realizzate delle opere di derivazione. Ad esempio la realizzazione di un serbatoio di regolazione di dimensioni sufficienti per prevedere una regolazione annuale del corso d'acqua comporta uno "spianamento" complessivo della curva di durata naturale dovuto alla laminazione offerta dal serbatoio durante le onde di piena e al rilascio costante del deflusso minimo vitale nei periodi di magra.

Avendo a disposizione un numero sufficiente di anni di osservazione è possibile costruire una curva di durata media del periodo di osservazione. La costruzione della curva richiede l'ordinamento decrescente del campione di 365 valori di portata media giornaliera per ogni anno di osservazione. Successivamente i valori vengono mediati sull'intero periodo di osservazione.

Osservando la curva è possibile inoltre individuare dei valori caratteristici:

- **“portata di piena ordinaria”**, corrispondente all’ascissa 91 giorni, che rappresenta la portata media giornaliera eguagliata o superata per il 25% del periodo annuale;
- **“portata semipermanente”**, corrispondente all’ascissa 182 giorni, che identifica la portata media giornaliera eguagliata o superata per il 50% del periodo annuale (rappresenta in pratica la mediana della distribuzione);
- **“portata di magra ordinaria”**, corrispondente all’ascissa 274 giorni, che identifica la portata media giornaliera eguagliata o superata per il 75% del periodo annuale;
- **“portata media annua”**, detta anche **modulo del corso d’acqua**.

2.2 Coefficiente di utilizzazione di un corso d’acqua

La curva di durata è di fondamentale importanza per il dimensionamento degli impianti idroelettrici, degli impianti di irrigazione e degli acquedotti.

Pur rispettando un certo andamento stocastico del fenomeno, poiché la portata naturale di un corso d’acqua varia casualmente nel tempo, non è economicamente conveniente la costruzione di impianti idraulici che siano in grado di sfruttare il deflusso per intero. Anche quando esiste un serbatoio di regolazione il volume dell’invaso generalmente non risulta abbastanza grande da garantire la completa utilizzazione degli afflussi nell’intervallo di regolazione del serbatoio. Si parla infatti, in questo caso, di regolazione parziale, in quanto una quantità d’acqua va perduta attraverso gli sfioratori in occasione delle piene.

Per progettare un’opera di derivazione è necessario analizzare la curva di durata delle portate nella sezione in cui si intende realizzare la presa.

L’area sottesa dalla curva di durata rappresenta il volume V_0 complessivamente transitante nel corso d’acqua ed è espresso dalla seguente relazione:

$$V_0 = \int_0^{Q_{max}} \theta * dQ \quad (2.1)$$

dove Q_{max} rappresenta il valore massimo annuale della portata media giornaliera, cioè il valore di portata in corrispondenza dell’ascissa “1 giorno”, θ rappresenta invece la durata espressa in giorni.

Gli impianti idraulici vengono progettati in funzione di una portata di progetto che rappresenta la massima portata derivabile dall'opera di presa dell'impianto. Tale portata, detta portata derivabile e indicata con Q_d viene stabilita decidendo in fase progettuale per quanti giorni all'anno l'impianto dovrà funzionare a pieno regime. Non è certamente vantaggioso dimensionare un impianto per durate troppo brevi in quanto le portate derivabili maggiori associate comportano anche un maggiore costo di realizzazione delle opere a fronte di una sottoutilizzazione dell'impianto per la maggior parte dell'anno. Valutata la durata per cui si intende far funzionare l'impianto a pieno regime, si ritrova la portata massima derivabile sull'asse delle ordinate della curva di durata.

Se, per esempio, si stabilisce una durata di 50 giorni, il grafico della figura seguente mostra che la portata derivabile Q_d è pari a poco meno di 40 m³/s.

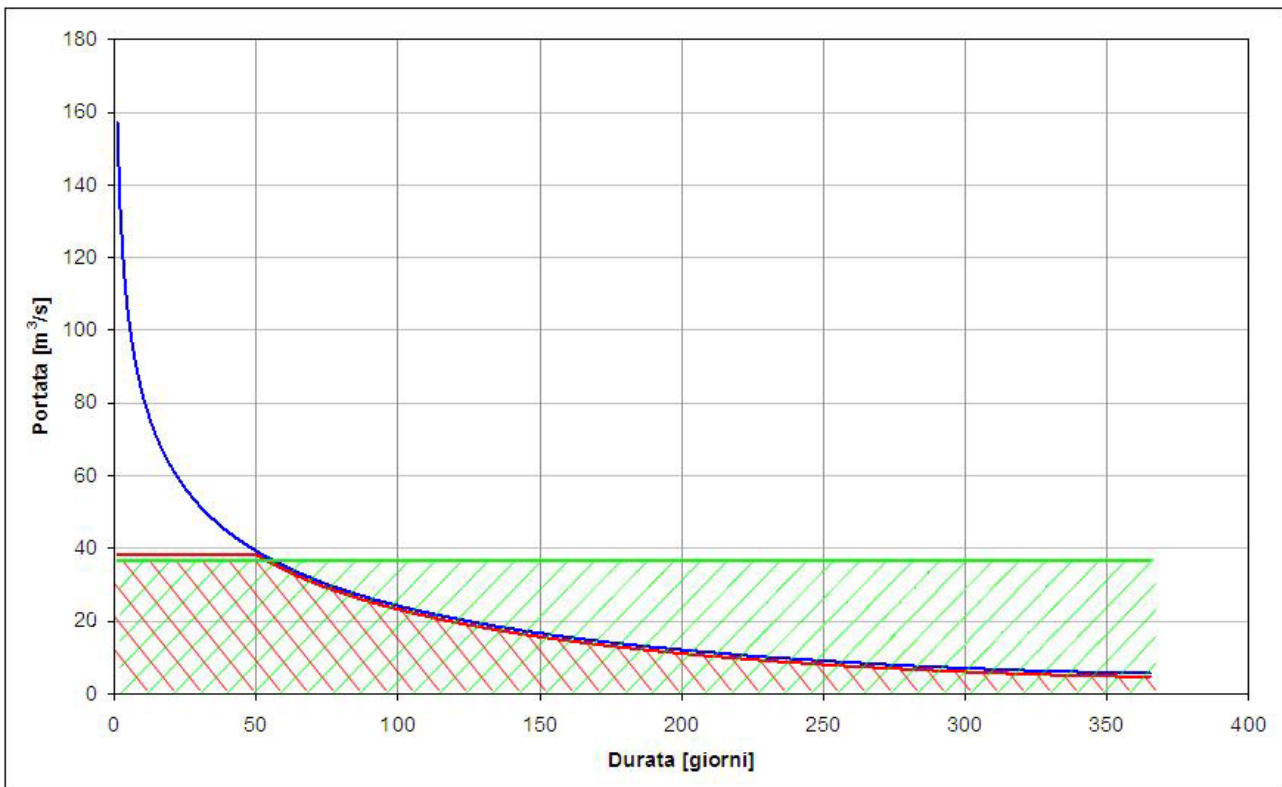


Fig. 2.3 Curva di durata e portate derivabili

Il volume d'acqua che l'impianto sarebbe in grado di utilizzare, se la portata fosse sempre maggiore o uguale a Q_d , è il seguente:

$$V_{Qd} = Q_d * 365 \tag{2.2}$$

Tale volume è rappresentato in figura dall'area sottesa dalla retta in verde.

Il volume d'acqua che l'impianto effettivamente deriva è espresso dalla seguente relazione:

$$V = \int_0^{Q_d} \theta * dQ \quad (2.3)$$

Tale volume è rappresentato dall'area sottesa dalla curva di colore rosso.

Noti i volumi in gioco in gioco è possibile definire il coefficiente di utilizzazione del corso d'acqua indicato con u , che è dato dal rapporto tra il volume V effettivamente derivato dall'impianto e il volume V_0 complessivamente transitante nel corso d'acqua:

$$u = \frac{V}{V_0} = \frac{\int_0^{Q_d} \theta * dQ}{\int_0^{Q_{max}} \theta * dQ} \quad (2.4)$$

Il coefficiente di utilizzazione rappresenta la percentuale del volume totale transitante nel corso d'acqua che viene effettivamente utilizzata dall'impianto.

E' possibile calcolare l'andamento di u al variare di Q_d ottenendo la curva di utilizzazione annuale dei deflussi del corso d'acqua.

La curva di utilizzazione esprime u in funzione di Q_d e risulta lineare finché il volume V cresce da 0 fino al volume minimo annuale. Quanto più rapidamente la curva di utilizzazione di un corso d'acqua tende al suo valore limite superiore 1 (quando $Q_d=Q_{max}$ e quindi $V=V_0$), cioè quanto più la portata è regolare nel corso dell'anno, tanto più tale corso d'acqua è adatto a uno sfruttamento economicamente vantaggioso: bastano infatti opere dimensionate su un valore di portata che non risulta esageratamente superiore a quello della portata media annua.

E' molto importante ricordare che la curva di durata deve essere sempre considerata al netto del deflusso minimo vitale (DMV), che rappresenta la portata minima che deve essere obbligatoriamente rilasciata per garantire la salvaguardia delle caratteristiche chimico-fisiche del corso d'acqua, della flora e della fauna a valle della captazione. Ogni Regione italiana stabilisce nel Piano di Tutela delle Acque l'entità e le modalità di rilascio del minimo deflusso vitale.

2.3 Modelli

I modelli sono costituiti da una serie di equazioni che tentano di rappresentare, in forma matematica, i processi fisici che costituiscono un fenomeno; queste equazioni possono essere più o meno complesse e possono contenere più o meno parametri. Servono nella descrizione del mondo reale e dei suoi fenomeni fisici.

I modelli si possono suddividere in due categorie: i modelli concettuali e i modelli fisicamente basati.

Nei primi la descrizione dei fenomeni fisici è semplicemente abbozzata e si utilizzano delle analogie con altri processi fisici e delle leggi empiriche per spiegare le peculiarità del fenomeno. Fondamentalmente nei modelli concettuali si descrive un processo fisico attraverso un concetto generale, mentre i parametri di un tale tipo di modello non hanno nulla a che vedere con la fisica del problema. Non presentano tuttavia difficoltà analitiche troppo marcate e il loro utilizzo è dettato dalla loro semplicità.

Nei modelli fisicamente basati si vuole descrivere il fenomeno in tutti i suoi dettagli, utilizzando equazioni generalmente più complesse e fornendo un significato fisico ai parametri introdotti. Questi modelli presentano una difficoltà risolutiva maggiore consistendo in generale di equazioni differenziali alle derivate parziali. Il vantaggio è comunque dato dal fatto che la stima dei parametri da utilizzare è legata al mondo fisico, di conseguenza, disponendo di un numero sufficiente di dati dettagliati, è possibile ottenere valori affidabili dei parametri e risultati molto più precisi.

2.4 Il processo di regionalizzazione

Per definire realisticamente la disponibilità idrica in una determinata sezione di un corso d'acqua e poterne quindi programmare l'utilizzazione è necessario conoscere la curva di durata media delle portate. In generale, solo su pochi corsi d'acqua e su poche sezioni sono installate stazioni idrometriche che consentono la misurazione delle portate medie giornaliere defluite. Pertanto solo su queste sezioni è possibile attraverso le serie storiche di portata media giornaliera costruire, secondo lo schema precedentemente illustrato, la curva di durata media delle portate. Per una corretta e oculata gestione della risorsa idrica in una certa area, è necessario definire la curva di durata media delle portate anche per i bacini privi di osservazioni dirette delle portate giornaliere. In

questi casi, peraltro molto frequenti, è necessario ricorrere a delle procedure di regionalizzazione. A partire da alcuni semplici parametri morfologici e idrologici, tali procedure permettono la stima della curva di durata media delle portate in una qualsiasi sezione fluviale sprovvista di misure idrometriche. Per calibrare le relazioni tra questi parametri e le caratteristiche della curva di durata è necessario utilizzare le misure disponibili nelle sezioni strumentate esistenti. Le procedure di regionalizzazione di una certa curva di durata sperimentale consentono di trovare una funzione analitica e i relativi parametri, per “zone omogenee di territorio” dette “regioni”, utilizzando un numero minimo di relazioni ricavate da dati sperimentali. Tali funzioni regionalizzate vengono ricercate per aree geo-morfo-climatiche omogenee in modo da riprodurre al meglio le curve sperimentali disponibili mediante l’applicazione di procedure di analisi statistica. La disponibilità di tali relazioni di regionalizzazione consente quindi di poter ottenere una stima della curva di durata media delle portate in qualsiasi sezione fluviale non monitorata compresa all’interno di una particolare regione.

Il processo di trasferimento delle informazioni dai bacini con dati misurati a quelli privi di dati attraverso un modello di regionalizzazione è tanto più affidabile quanto più l’informazione idrometrica diretta è ampia, sia in termini di lunghezza delle serie temporali sia in termini di distribuzione spaziale sul territorio.

2.5 Modelli regionali per la stima delle curve di durata

L’analisi della letteratura specialistica ha evidenziato che esistono esperienze di applicazione dell’approccio regionale per la stima delle curve di durata delle portate a partire almeno dagli anni ’80. Di seguito si descrivono brevemente i risultati ottenuti in alcune di tali ricerche.

Nel 1983, uno studio condotto su 35 bacini delle Filippine in zone morfo-climatiche omogenee, utilizzando una distribuzione di tipo esponenziale, ha portato alla definizione di un modello regionale i cui parametri dipendono dalla precipitazione annua media e dall’area dei bacini.

Nel 1988, uno studio condotto su alcuni bacini campani, utilizzando una distribuzione di tipo esponenziale, ha portato alla definizione di un modello regionale dei deflussi di magra, i cui parametri dipendono dalla precipitazione annua media netta e dall’area dei bacini.

Uno studio eseguito su 23 bacini del Massachussets, utilizzando una distribuzione di tipo log-normale a due parametri, ha portato allo sviluppo di un modello regionale della curva di durata delle portate i cui parametri dipendono dall’area dei bacini e dalla differenza tra la massima e la minima quota.

Nel 1997, il Politecnico di Milano, nell'ambito di una ricerca commissionata dalla Regione Lombardia svolta dal gruppo di lavoro formato da: Prof. Ing. Alessandro Paoletti, Prof. Ing. Alberto Bianchi, Dott. Ing. Gianfranco Becciu e Prof. Arch. Giuseppe Gambirasio, ha elaborato le curve medie durata di 20 stazioni idrometriche site in Lombardia con una sufficiente informazione idrologica. Sulla base di queste è stato sviluppato un modello regionale per l'area di indagine e in generale per l'intera Lombardia alpina e prealpina. Tale modello è costituito dall'espressione di Weibull a tre parametri, infatti il confronto tra le curve di durata medie osservate e quelle riprodotte con l'espressione di Weibull a tre parametri mostra un ottimo accordo per tutte le stazioni, evidenziando la sua capacità di interpretare curve di durata caratterizzate da forme molto differenti tra loro. Tale modello dipende soltanto da tre parametri: l'area del bacino, la precipitazione annua media e la pendenza media.

Nel 2006 è stata eseguita a opera del CESI Ricerca S.p.A. la regionalizzazione delle curve di durata medie giornaliere nell'area alpina che si estende dall'Adamello alle Alpi Orobie Meridionali. In particolare la zona oggetto di indagine, comprende i seguenti bacini idrografici: alto Sarca, Oglio sopralacuale e lacuale, Serio e Brembo montani. In questo studio si sono considerate le portate naturalizzate senza l'effetto i eventuali invasi presenti. Tale studio ha messo in evidenza che le equazioni che meglio riproducono l'andamento della curva di durata delle portate medie giornaliere nell'area di studio sono l'equazione logaritmica a due parametri proposta da Minikou e Koemaki e la Weibull a tre parametri. I parametri più significativi per la stima della curva di durata in una data sezione sono risultati essere i seguenti: l'area del bacino sotteso, la lunghezza dell'asta principale, il dislivello del bacino e la precipitazione media annua netta.

Altri studi andranno completandosi nel tempo anche grazie alla necessità da parte degli organi istituzionali di completare la pianificazione e la programmazione. Per esempio la Regione Piemonte ha sfruttato questa metodologia nelle indagini e negli studi finalizzati alla predisposizione del Piano di Tutela delle Acque (D.Lgs152/1999), la Provincia di Bergamo nella coordinazione del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (D.Lgs 267/2000). Innumerevoli anche gli studi condotti da società private, soprattutto nell'ambito della produzione idroelettrica. D'altra parte la curva di durata è stata utilizzata storicamente proprio nel contesto della produzione idroelettrica.

Nell'Anno Accademico 2009/2010 al Politecnico di Milano sono state presentate tre tesi che hanno studiato e approfondito il tema della regionalizzazione della curva di durata:

“Stima del parametro di forma per le curve di durata”, di Mirco Bissolati, che ha approfondito la ricerca commissionata dalla Regione Lombardia e condotta dal gruppo di lavoro del Politecnico di Milano nel 1997, e ha individuato delle espressioni per calcolare il parametro di forma β della distribuzione di Weibull, che lo studio di riferimento precedente non era stato in grado di definire.

“La curva di durata regionalizzata. Analisi dei piccoli bacini”, di Domenico Cozzi, che ha applicato la procedura di regionalizzazione ai piccoli bacini delle Alpi occidentali e dell’Appennino Emiliano e ha individuato, per le due regioni considerate, delle relazioni di regressione tra i parametri della distribuzione di Weibull e alcune grandezze morfologiche e idrologiche dei bacini stessi (quota media e piovosità media annua) ;

“La regionalizzazione della curva di durata delle portate nei bacini montani: Trentino-Alto Adige e Veneto”, di Mauro Crapella, che ha individuato, attraverso la stessa metodologia, delle relazioni di regressione valide per il bacino del Piave e la regione che comprende i bacini dell’Adige e del Brenta.

2.6 Opportunità di un modello generale per l’arco alpino

In tutti i modelli regionali sviluppati per le regioni alpine e prealpine italiane si osserva che la precipitazione media annua e la quota media del bacino giocano un ruolo importante. Inoltre si osserva come la distribuzione di Weibull si adatti bene a interpretare le curve di durata delle portate osservate.

Attualmente, per quanto riguarda il settore alpino e prealpino italiano, sono state sviluppate, attraverso gli ultimi tre lavori sopracitati, cinque modelli regionali applicabili alle relative regioni (Appennino Ligure-Emiliano, Alpi Occidentali, Lombardia, Adige e Brenta, Piave).

Questi modelli sono molto utili per la progettazione di opere di derivazione su torrenti per i quali non si può disporre di dati storici relativi a misure di portata, presentano un buon livello di precisione nella stima della curva di durata delle portate, ma hanno lo svantaggio di poter essere applicati soltanto all’interno delle regioni indicate.

Nasce pertanto l’esigenza di approfondire ulteriormente i lavori pregressi con lo scopo di verificare la possibilità di sviluppare un modello che possa essere altrettanto preciso ma applicabile a tutto l’arco alpino, considerando la presenza di regioni diverse per caratteristiche climatiche e morfologiche. Non si parlerà quindi in questo caso di modello regionale ma di modello “macroregionale”.

All’interno di questo elaborato, che cerca di soddisfare questa esigenza, tutti i dati raccolti e utilizzati nei tre precedenti lavori vengono rianalizzati, confrontati e adimensionalizzati per renderli omogenei e utilizzabili nel loro insieme.

La distribuzione di Weibull a tre parametri

Poiché i modelli sviluppati nei tre elaborati a cui questo lavoro fa riferimento utilizzano la distribuzione di Weibull a tre parametri per la stima delle curve di durata delle portate, è doveroso illustrare le nozioni fondamentali utili alla comprensione di questo tipo di distribuzione.

3.1 Formulazione matematica e applicazione alle curve di durata

La distribuzione di Weibull è la più utilizzata nel campo affidabilistico in quanto rappresenta tutte le fasi di vita di un dato fenomeno che evolve nel tempo e che riguarda un gran numero di dati.

L'espressione matematica della funzione di densità di probabilità di Weibull è la seguente:

$$f(x; k, \eta, \theta) = \frac{k}{\eta} \left(\frac{x-\theta}{\eta} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-\theta}{\eta} \right)^k} \quad (3.1)$$

dove k, η, θ sono i parametri della distribuzione, chiamati rispettivamente parametro di forma, parametro di scala e parametro di spostamento rispetto allo zero.

Il parametro di forma ha una notevole influenza sulla distribuzione di Weibull, infatti, per $k > 1$ tende ad una distribuzione normale, mentre per $k = 1$ si riduce ad una distribuzione esponenziale.

L'espressione della funzione di probabilità di non superamento ottenuta integrando la funzione di densità di probabilità è la seguente:

$$F(x; k, \eta, \theta) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\theta}{\eta}\right)^k} \quad (3.2)$$

Questa espressione è legata alla durata di un particolare evento. Mentre la distribuzione esponenziale descrive la durata di vita di un fenomeno privo di memoria, la distribuzione di Weibull esprime la durata di vita per un fenomeno la cui probabilità di morire può variare nel tempo, in funzione del parametro k .

Quindi è possibile scrivere un legame tra la durata δ e la probabilità di non superamento di questo tipo:

$$\delta = 365(1 - F(x; k, \eta, \theta)) \quad (3.3)$$

In genere si utilizza l'espressione che fornisce la portata in funzione della durata. Di conseguenza si ottiene:

$$x = \theta - \eta \left[\ln \left(\frac{\delta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{k}} \quad (3.4)$$

L'espressione più comune nello studio delle curve di durata delle portate è però la seguente:

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\delta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.5)$$

dove q è la portata specifica $\left[\frac{l}{s \cdot km^2} \right]$, ε è il parametro di spostamento $\left[\frac{l}{s \cdot km^2} \right]$, $\lambda - \varepsilon$ è il parametro di scala $\left[\frac{l}{s \cdot km^2} \right]$ e β è il parametro di forma (adimensionale). In particolare è possibile osservare come ad una durata pari a 365 giorni, corrisponda la portata con una probabilità di non superamento nulla. Cioè a 365 giorni corrisponde la portata con una probabilità di superamento unitaria, ovvero la minima portata.

I parametri del modello possono essere espressi in funzione dei momenti statistici della distribuzione secondo il metodo di stima dei parametri chiamato metodo dei momenti. Le formule necessarie sono le seguenti:

$$\mu(q) = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon)\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3.6)$$

$$\sigma(q) = (\lambda - \varepsilon) \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

$$\gamma(q) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{\beta}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.8)$$

dove μ , σ e γ sono rispettivamente la media, la deviazione standard e il coefficiente di asimmetria della curva di durata e λ , ε e β sono i parametri della distribuzione di Weibull mentre $\Gamma(\cdot)$ rappresenta la funzione gamma. Si nota come l'asimmetria della curva dipenda soltanto dal parametro di forma della distribuzione.

Indagini sulla bontà di adattamento di alcune distribuzioni di probabilità alle serie storiche delle portate osservate sono state effettuate da vari ricercatori: Joseph (1970) utilizzando le serie dei minimi annuali delle portate medie di durata di 14 giorni in 37 stazioni del bacino del Missouri (USA) ha messo a confronto cinque distribuzioni (normale, normale delle radici cubiche, log-normale a 2 parametri, gamma a 3 parametri, Weibull a due parametri) e sulla base del test di Pearson ha trovato preferibile la distribuzione gamma, seguita da quella di Weibull e dalla log-normale. Fugazza e Moisello (1978) tra le quattro distribuzioni esaminate (log-normale, gamma, Weibull a 2 parametri, Weibull a 3 parametri) per la serie dei minimi annuali del Po a Pontelagoscuro di durata 1, 3, 15, 30 e 60 giorni hanno trovato preferibile la legge di Weibull a tre parametri, seguita dalla legge log-normale e dalla gamma.

Questi studi, uniti ad altri avvenuti negli anni più recenti, hanno dimostrato come questa distribuzione sia la più adatta a rappresentare curve di durata delle portate naturali. Di conseguenza l'utilizzo di questa espressione è divenuto molto diffuso nel mondo accademico.

3.2 Influenza dei parametri λ , ε e β sulle curve di durata

Il modello di Weibull sopra descritto necessita della definizione di tre parametri per il suo utilizzo. Lo scopo dei lavori pregressi è stato quello di trovare delle relazioni che legassero questi parametri a delle caratteristiche fisiche del bacino idrografico che fossero determinabili con maggiore facilità non avendo a disposizione misure dirette di portata. Molto importante è comprendere come questi parametri influenzano le caratteristiche della curva di durata delle portate e cercare di attribuire un significato fisico a questo comportamento.

Per risolvere questo problema si può procedere andando a variare il valore di un parametro mantenendo fissi i restanti. Ad esempio se si vuole comprendere l'influenza del parametro λ occorrerà fissare gli altri due parametri ad un determinato valore ed osservare il comportamento della curva di durata al variare di questo parametro.

I valori che sono stati scelti come riferimento nel corso di questa analisi sono riportati nella tabella seguente, ovviamente nella loro scelta si è comunque cercato di non assegnare valori inammissibili dal punto di vista fisico, anche se possibili dal punto di vista matematico. Infatti come sarà maggiormente chiaro in seguito, i valori di questi parametri sono legati ai valori di portata, che ovviamente hanno dei limiti fisici di validità.

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>	<i>UDM</i>
λ	25	$l/s/km^2$
ε	0	$l/s/km^2$
β	1	-

Tab. 3.1 Valori di riferimento per i parametri λ , ε e β

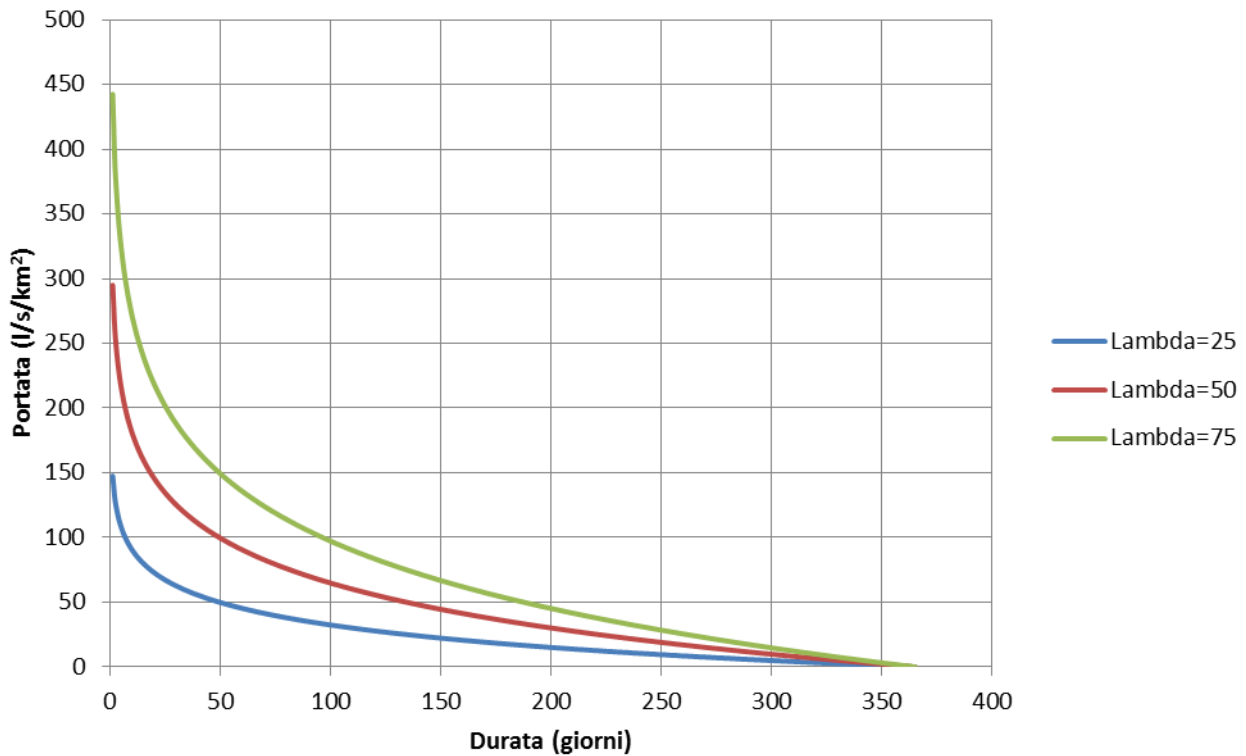


Fig. 3.1 Curve di durata secondo Weibull con $\varepsilon=0$ e $\beta=1$ al variare di λ

In primo luogo viene analizzato l'effetto del parametro λ . Si vede chiaramente dal grafico riportato in fig. 3.1 come all'aumentare del parametro aumentino anche tutte le portate a parità di durata. In particolare l'effetto di questo aumento va via via diminuendo fino ad annullarsi in corrispondenza della durata massima, ovvero all'ascissa pari a 365 giorni. Questo fatto è legato al valore del parametro ε che sarà maggiormente chiaro tra poco. Inoltre si capirà come λ sia legato in modo molto netto con la media della curva di durata, di conseguenza il comportamento osservato non deve stupire.

Osservando allora il grafico in fig. 3.2, che mostra il comportamento del parametro ε , ovvero il parametro di spostamento della distribuzione, si nota come questo valore corrisponda alla portata minima della curva di durata ovvero, in altri termini, alla portata che presenta la durata maggiore, quella che è presente nel letto del corso d'acqua per tutto l'anno (nel caso di regime torrentizio tale parametro risulta pari a zero). Si comprende come debbano esistere dei limiti fisici nei riguardi di ε , infatti un valore negativo di questo parametro consentirebbe valori negativi della variabile aleatoria che non sono fisicamente accettabili. Il parametro di spostamento definisce quindi l'ordinata più piccola della curva e insieme al parametro λ indica un diverso comportamento a seconda delle caratteristiche idrologiche del corso d'acqua rappresentato dalla curva. Infatti all'aumentare di ε bisogna considerare che diminuisce la differenza $\lambda-\varepsilon$. Nel grafico, passando dalla curva blu alla

curva verde, si parte da un comportamento tipico di corsi d'acqua montani dal carattere spiccatamente torrentizio per arrivare a veri e propri fiumi di pianura dove non si riscontra una variabilità impulsiva delle portate.

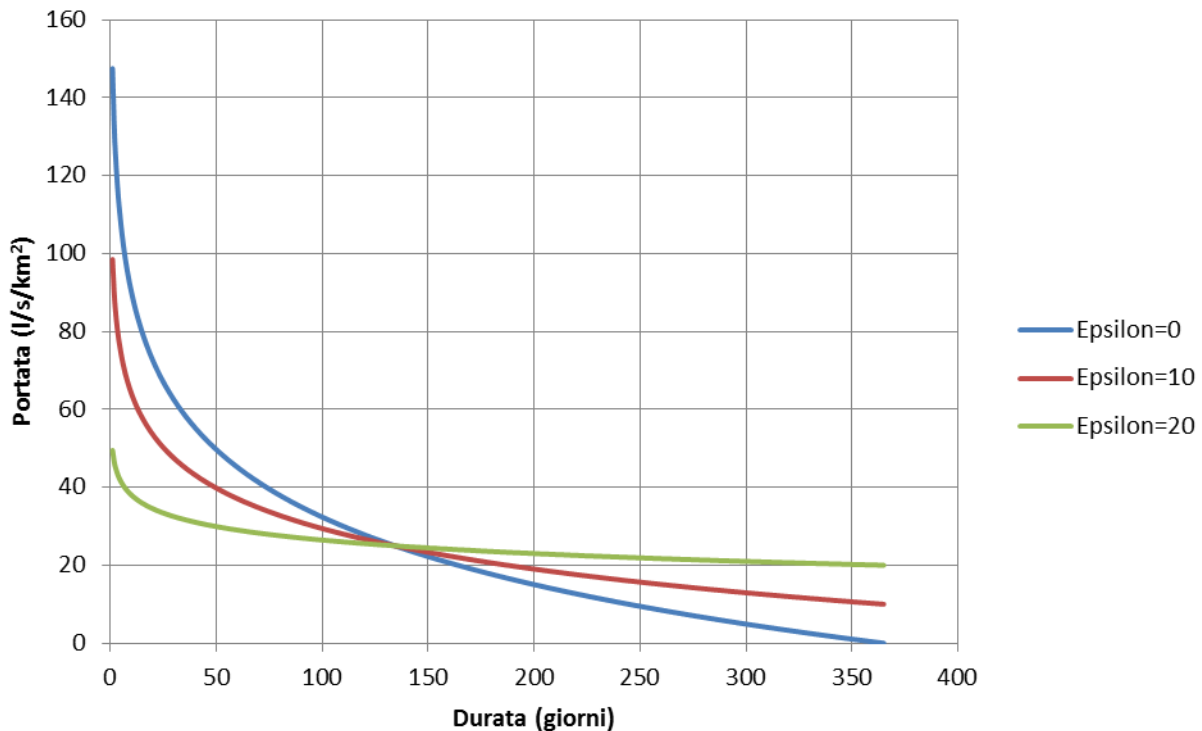


Fig. 3.2 Curve di durata secondo Weibull con $\lambda=25$ e $\beta=1$ al variare di ε

L'influenza del parametro β sulla forma della curva è notevole, infatti, come è possibile osservare dal grafico in fig. 3.3, per valori del parametro β inferiori all'unità, l'espressione della curva di durata risulta molto ripida. Per piccole durate si verificano portate molto elevate se comparate con le portate che invece si registrano per le durate maggiori. Questa forma assunta dalla curva è tipica del regime idrologico di un corso d'acqua montano, a carattere torrentizio.

Mano a mano che il valore di β cresce, la curva risulta sempre più piatta con portate di piccola durata che non differiscono molto rispetto alle portate di maggiore durata. Tale comportamento è caratteristico dei corsi d'acqua vallivi. Si può osservare come addirittura la curva con un valore del parametro di forma pari a 1.5 quasi scompare se confrontata con la curva blu in figura. Si osservi inoltre come per le durate maggiori le portate della curva verde siano le più grandi se confrontate con quelle delle altre due curve.

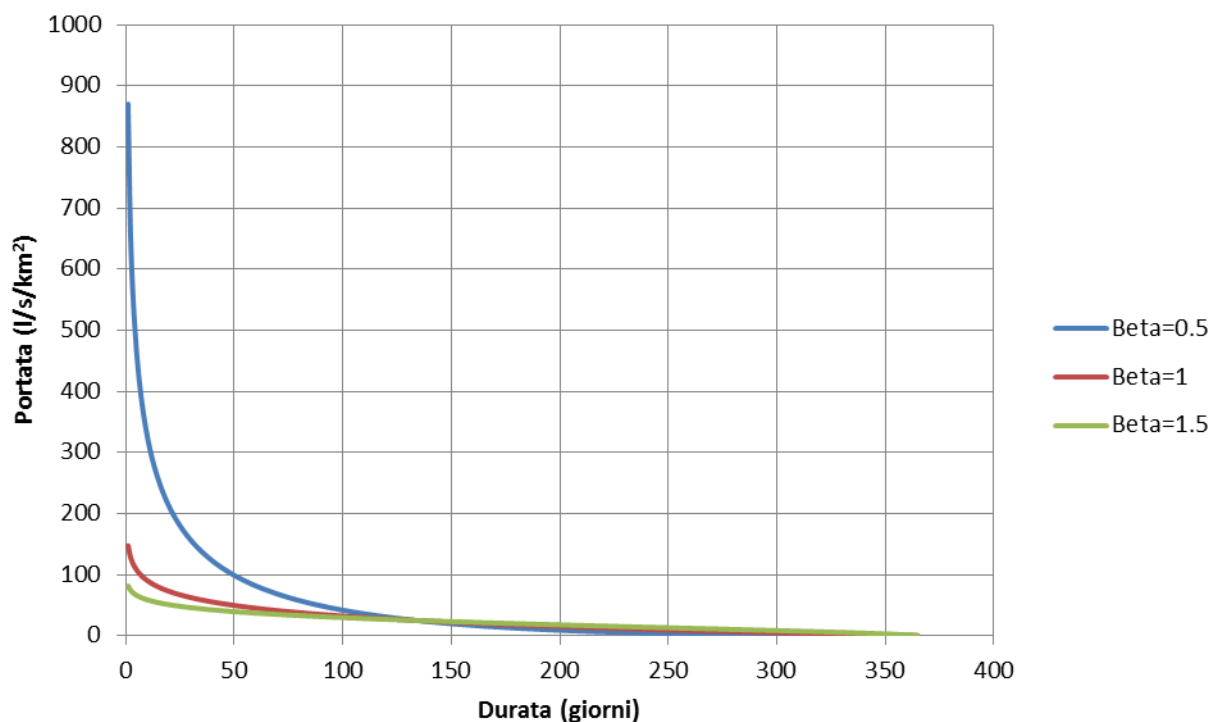


Fig. 3.3 Curve di durata secondo Weibull con $\lambda=25$ e $\varepsilon=0$ al variare di β

È possibile verificare l'influenza dei parametri del modello anche considerando le funzioni di densità di probabilità, che posseggono un interesse pratico minore, ma evidenziano bene le caratteristiche fisiche possedute dai parametri. Viene proposto come esempio un confronto tra la curva di probabilità del Fiume Adda alla stazione idrometrica di Tirano e la curva di probabilità dello stesso corso d'acqua alla stazione di Spino d'Adda (figure 3.4 e 3.5). In ascissa è riportato il valore della portata normalizzato rispetto alla portata massima registrata, mentre in ordinata è riportata la probabilità associata al singolo valore di portata.

Si nota molto bene il comportamento differente tra le due situazioni: la prima presenta caratteristiche di tipo torrentizio, la seconda possiede valori dei parametri tipici di una stazione valliva. L'adattamento della seconda stazione è leggermente peggiore e questo è dovuto alla forte antropizzazione che caratterizza il bacino in quella sede. Le caratteristiche elencate durante l'analisi di sensibilità dei parametri del modello vengono confermate: ε rappresenta il valore più piccolo possibile della portata, $\lambda - \varepsilon$ risulta più grande per la stazione di Tirano come ci si aspetta per una situazione di tipo torrentizio, β raggiunge un valore di 3 per la stazione di Spino d'Adda come evidenziato per un corso d'acqua vallivo. Per la stazione di Tirano si può notare inoltre una netta asimmetria della distribuzione, in quanto la probabilità è concentrata nei valori più piccoli della variabile. Completamente diverso invece è il discorso per la stazione di Spino d'Adda: la

probabilità tende ad essere concentrata attorno ai valori intermedi della variabile con un comportamento che si avvicina alla distribuzione normale.

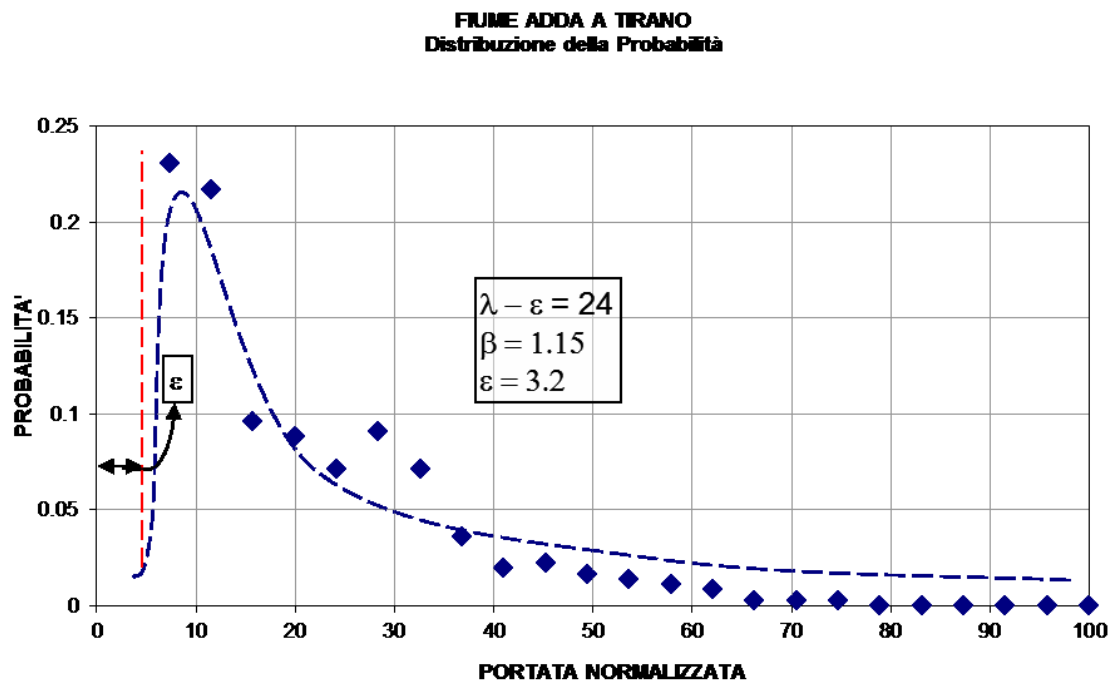


Fig. 3.4 Curva di probabilità di Weibull per il Fiume Adda a Tirano

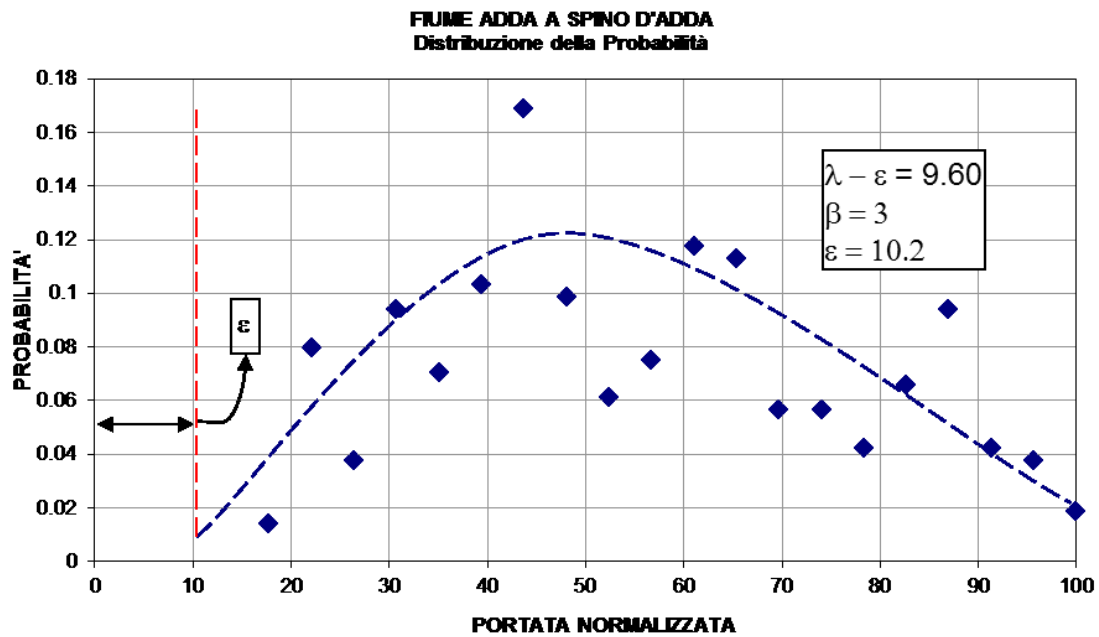


Fig. 3.4 Curva di probabilità di Weibull per il Fiume Adda a Spino d'Adda

L'analisi di sensibilità condotta consente di valutare il comportamento dei parametri del modello e di osservare la loro influenza sull'andamento della curva di durata delle portate. Le conclusioni tratte trovano riscontro anche nei casi reali, rafforzando l'idea che questo tipo di modello permette veramente di comprendere i concetti principali alla base della curva di durata.

Nonostante la distribuzione di Weibull a tre parametri non rappresenti un modello fisicamente basato, si può concludere comunque che i suoi parametri in funzione dei valori assunti sono in grado di descrivere alcune caratteristiche fondamentali del regime idrologico di un particolare corpo idrico. Questo fatto è molto importante perché un modello di questo tipo è di facile applicazione, mentre un modello a parametri fisicamente basati risulta molto complesso e di difficile taratura.

Aree di indagine e principali risultati pregressi

Come già detto nel capitolo 2, in questo elaborato si farà riferimento ai dati utilizzati all'interno degli studi pregressi nell'ambito delle zone alpine, prealpine ed appenniniche del Nord Italia. Vediamo ora nel dettaglio le aree di indagine considerate negli elaborati precedenti e i principali risultati ottenuti.

4.1 Lombardia

La tesi elaborata da Bissolati sulla stima del parametro di forma per le curve di durata all'interno dei bacini lombardi si riconduce allo studio condotto dal Politecnico di Milano, per conto della Regione Lombardia, relativo all'individuazione delle curve regionalizzate di durata delle portate per la Lombardia alpina e prealpina.

Tale studio ha dimostrato che la distribuzione statistica che meglio si adatta alle curve di durata osservate è la distribuzione di Weibull a tre parametri:

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.1)$$

dove q è la portata specifica $\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$, ε è il parametro di spostamento $\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$, $\lambda - \varepsilon$ è il parametro di scala $\left[\frac{l}{s \cdot km^2}\right]$ e β è il parametro di forma (adimensionale).

I parametri del modello possono essere espressi in funzione dei momenti statistici della distribuzione secondo il metodo dei momenti illustrato al capitolo 3 attraverso le formule (3.6), (3.7) e (3.8).

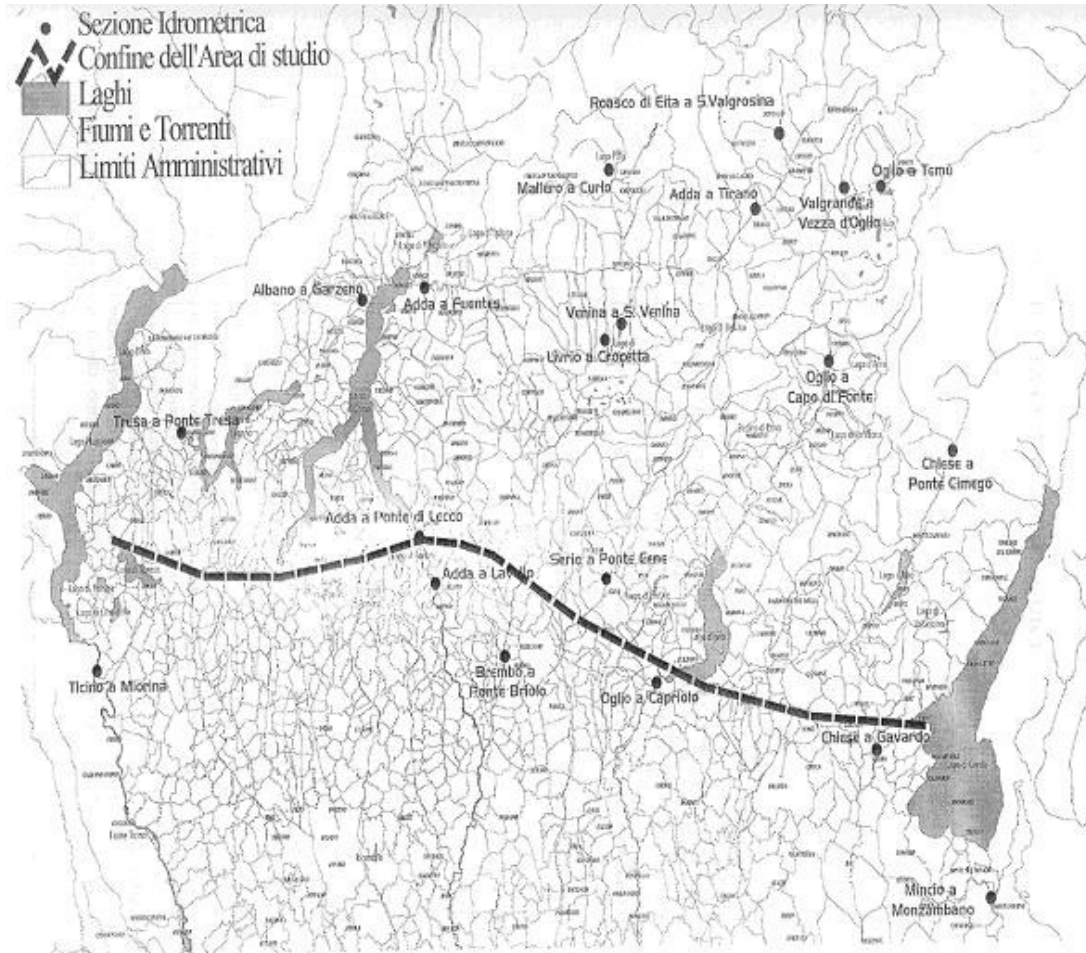


Fig. 4.1 Sezioni idrografiche considerate nello studio iniziale condotto sui bacini lombardi

Come si può vedere nella mappa soprastante (fig. 4.1) lo studio iniziale condotto dal Politecnico di Milano aveva considerato numerosi bacini lombardi: dai piccoli bacini montani a carattere fortemente torrentizio ai grandi bacini fluviali di pianura. Bissolati per la stima di λ e $\lambda - \varepsilon$ ha ripreso le espressioni fornite dai risultati dello studio del Politecnico cui fa riferimento:

$$\lambda = 4 + 0,86 * \mu(q) = 4 + 0,22 * P \tag{4.2}$$

$$\lambda - \varepsilon = 10,83 + 99,98 * i_m \tag{4.3}$$

Tale studio non riportava tuttavia una relazione per la stima del parametro di forma β . Perciò il lavoro di Bissolati si è concentrato sull'individuazione di una relazione per la stima di β .

Analizzando l'espressione di Weibull si può ricavare una funzione analitica per esprimere β :

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.4)$$

$$y = \frac{q - \varepsilon}{\lambda - \varepsilon} = \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.5)$$

$$\ln(y) = \frac{1}{\beta} \ln \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right] \quad (4.6)$$

$$\beta = \frac{\ln \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]}{\ln(y)} \quad (4.7)$$

Si può notare che per $\ln(y) \rightarrow 0$, $\beta \rightarrow \infty$

Ciò accade se $y = \frac{q - \varepsilon}{\lambda - \varepsilon} = 1$ ovvero quando $\lambda = q$

Considerando l'espressione per la stima di λ si può dire che per valori di q che si avvicinano al valore di portata media la funzione β tende all'infinito.

Bisognerebbe quindi considerare due valori di β : β_1 per le brevi durate e β_2 per le durate maggiori.

La durata critica tale per cui la funzione β tende all'infinito non è tuttavia determinabile in modo univoco, in quanto questa risulta variabile da bacino a bacino. In fig. 4.2 sono riportati gli andamenti del parametro β in funzione della durata per tre diversi bacini di riferimento.

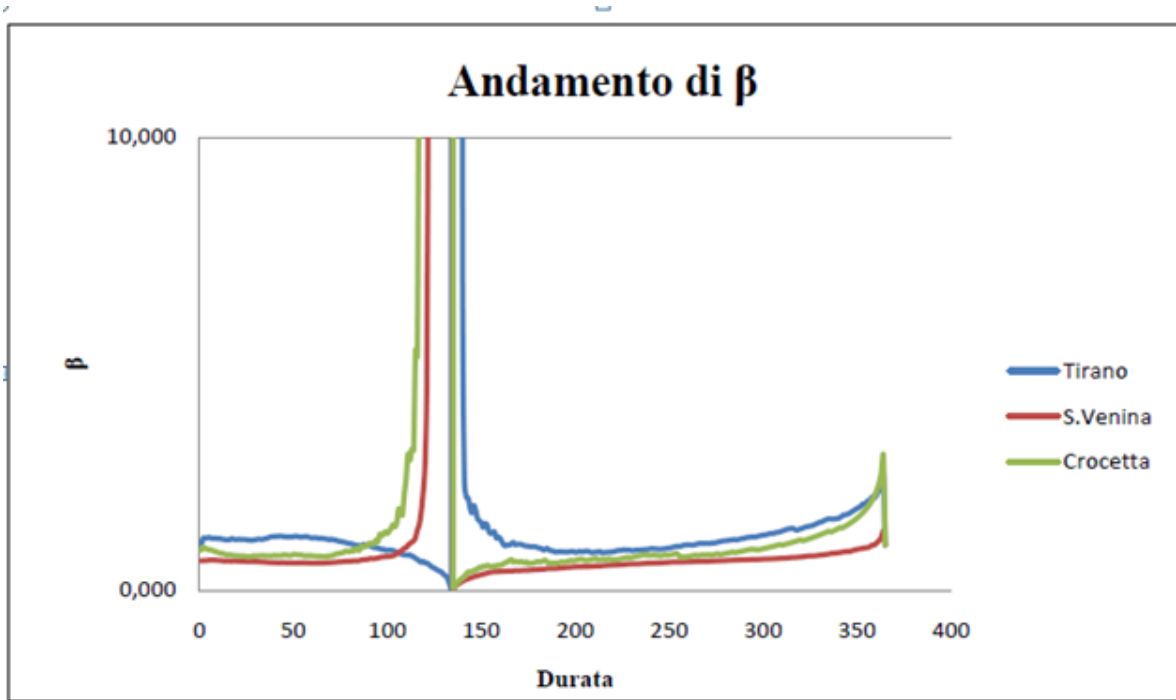


Fig. 4.2 Andamento del parametro β in funzione della durata per i bacini dell’Adda a Tirano, del Venina a S. Venina e del Livrio a Crocetta

E’ emerso inoltre che β_1 e β_2 non possono essere correlati in maniera significativa con nessuna caratteristica propria dei bacini.

Esiste tuttavia un’ottima correlazione tra la portata massima, la cui determinazione può avvenire attraverso le relazioni proposte dal rapporto VAPI (progetto per la valutazione delle piene in Italia), e la portata in corrispondenza della quale β tende all’infinito, chiamata q_{salto} . La relazione proposta per il calcolo di q_{salto} è la seguente:

$$q_{salto} = 0,2232 * q_{max}^{1,0277} \tag{4.8}$$

In seguito si è osservato che β_1 si correla bene con il rapporto tra q_{salto} e q_{max} . E’ quindi possibile stimare il parametro β_1 attraverso la seguente relazione:

$$\beta_1 = 1,9856 * \left(\frac{q_{salto}}{q_{max}}\right)^{0,518} \tag{4.9}$$

L’autore ha ritenuto opportuno scegliere come durata critica (in corrispondenza della quale si ha il passaggio da β_1 a β_2) la durata corrispondente a 92 giorni.

Per quanto riguarda β_2 si è pensato di correlarla al volume defluito per durate comprese tra 93 e 365 giorni.

Andando ad integrare l'espressione di Weibull tra 93 e 365 giorni si può ricavare una funzione H che dipende da λ , da ε e dal volume deflusso per quell'intervallo di durate.

$$H(\lambda, \varepsilon, vol(93 - 365)) = 1,37^{\frac{1}{\beta}} * (1 + \frac{0,73}{\beta}) \quad (4.10)$$

Una volta calcolata H si può quindi stimare β_2 :

$$\beta_2 = 0,5153 * H^{1,7434} \quad (4.11)$$

Questo approccio tuttavia non può essere applicato ai bacini non monitorati poiché in tali casi non è noto il volume medio di deflusso. Bisognerebbe quindi calcolare β_2 a partire da grandezze geomorfologiche o climatiche facilmente reperibili.

Considerando due β distinti si ottiene questo modello:

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta_1}} \quad \text{per } (0 < \theta \leq 92) \quad (4.12)$$

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta_2}} \quad \text{per } (92 < \theta \leq 365) \quad (4.13)$$

$$\lambda = 4 + 0,86 * \mu(q) = 4 + 0,22 * P \quad (4.14)$$

$$\lambda - \varepsilon = 10,83 + 99,98 * i_m \quad (4.15)$$

$$\beta_1 = 1,9856 * \left(\frac{q_{salto}}{q_{max}} \right)^{0,518} \quad (4.16)$$

$$\beta_2 = 0,5153 * H^{1,7434} \quad (4.17)$$

I volumi medi annui di deflusso stimati con questo modello si avvicinano molto a quelli osservati (vedi tab. 4.1). Tuttavia bisogna ricordare che non è possibile calcolare H senza conoscere i volumi defluiti osservati e ciò rappresenta un forte limite di applicabilità.

Località	Vol totale oss. (m3)	VOLUME TOT (m3)	Rapporto Vol. tot.
Roasco	66223113,91	65880133,28	0,995
Mallero a Curlo	145849974,5	135059582,7	0,926
Tirano	750732354	788296156,5	1,050
S. Venina	20536061,55	17329247,33	0,844
Crocetta	15378192	16102325,91	1,047
Fuentes	2695086976	2515731615	0,933
Ponte Cene	658576478	594124706,7	0,902
Ponte di Lecco	5280811223	5692140497	1,078
Lavello	4969943746	4964223187	0,999
Ponte Briolo	920308070,2	839223223,8	0,912
Veza d'Oglio	29316663,62	36607138,18	1,249
Temù	159524029,4	176828286	1,108
Capo di Ponte	882144864	883572839,4	1,002
Cimengo	288477352,8	278855149,5	0,967
Gavardo	1056579534	1008637414	0,955
Capriolo	1835924861	1837656770	1,001
Monzambano	1825598914	2059034122	1,128
Miorina	9168667106	9096007101	0,992
Ponte Tresa	806547830,4	847398003	1,051

Tab. 4.1 Confronto tra i volumi medi annui defluiti osservati e stimati per i bacini Lombardi

4.2 Alpi occidentali e Appennino Ligure-Emiliano

I dati analizzati da Cozzi nella propria tesi riguardano bacini alpini, prealpini e appenninici del Piemonte, bacini della Liguria appartenenti al bacino idrografico del Po e bacini appenninici dell'Emilia Romagna.

In questo caso sono stati scelti bacini con un'estensione inferiore ai 1000 Km² privi di opere di presa/restituzione o serbatoi artificiali (piccoli bacini non regolati).

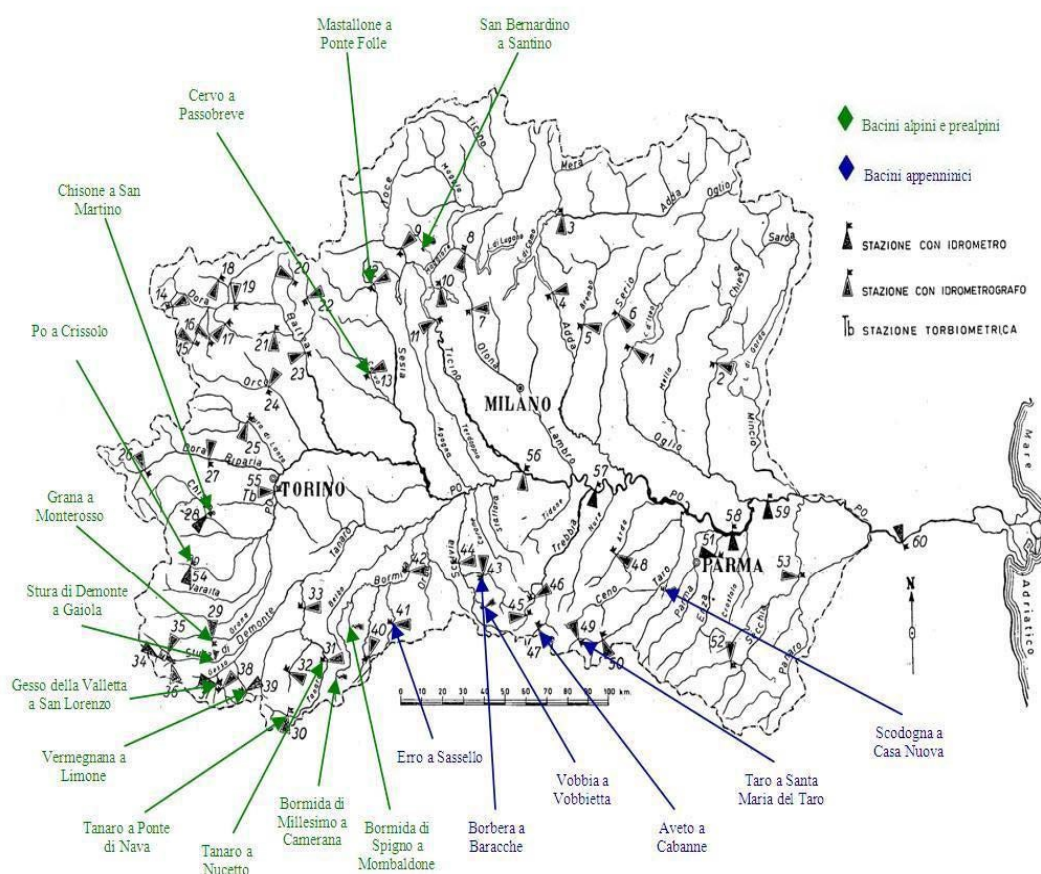


Fig. 4.3 Bacini alpini, prealpini e appenninici – settore piemontese e ligure

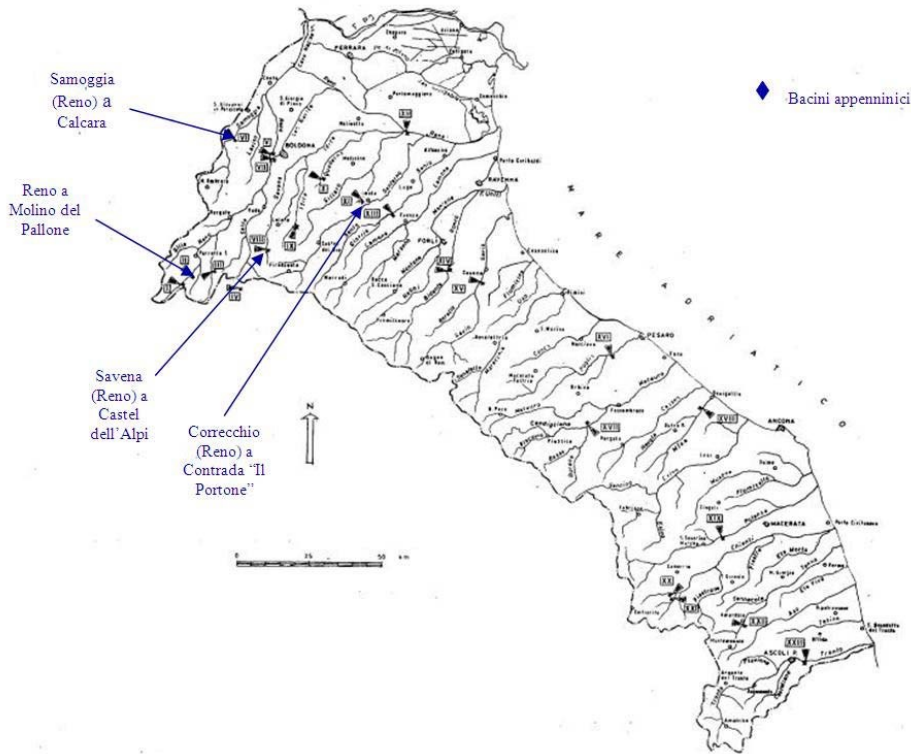


Fig. 4.4 Bacini appenninici – settore emiliano

Anche in questo elaborato è stata scelta la distribuzione di Weibull a tre parametri per la stima delle curve di durata.

Considerando globalmente tutti i bacini le correlazioni tra i parametri della distribuzione e le caratteristiche geo-morfo-climatiche sono risultate piuttosto scarse.

Perciò si è deciso di suddividere i bacini in due zone: Alpi Occidentali e Appennini.

Il modello proposto è il seguente (MOD.1):

- Alpi Occidentali

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \tag{4.18}$$

$$\lambda = 0,0468 * P - 30,31 \tag{4.19}$$

$$\lambda - \varepsilon = 0,0002 * (P * Hmed)^{0,7739} \tag{4.20}$$

$$\beta = 0,0297 * Hmed^{0,429} \tag{4.21}$$

N.B. Sono stati esclusi dall'indagine i seguenti bacini perché considerati situati in una zona geomorfo-climatica molto diversa: San Bernardino a Santino, Cervo a Passobreve e Mastallone a Ponte Folle. Come si può osservare dalla mappa in fig. 4.3, tali bacini si trovano infatti nella parte settentrionale del Piemonte, mentre tutti gli altri bacini sono situati nella parte sudoccidentale. E' stata inoltre esclusa la Bormida di Millesimo a Camerana poiché a monte della stazione di misura è stata rilevata la presenza di una grossa presa ad uso industriale che la priva quasi interamente della sua portata.

- Appennino

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.22)$$

$$\lambda = 0,0212 * P - 12,17 \quad (4.23)$$

$$\lambda - \varepsilon = 0,0002 * (P * Hmed)^{0,8068} \quad (4.24)$$

$$\beta = 0,2456 * Hmed^{0,121} \quad (4.25)$$

Anche Cozzi ha fatto notare che sarebbe opportuno considerare β_1 e β_2 e ha sviluppato un altro modello nel quale per le durate brevi ha proposto come Bissolati il calcolo di β_1 a partire da q_{\max} (facendo anch'egli riferimento al rapporto VAPI).

Ha inoltre individuato come durata critica 129 giorni per le Alpi Occidentali e 135 giorni per gli Appennini.

Ha proposto infine di calcolare β_2 come il normale β calcolato nei modelli iniziali.

Le relazioni che caratterizzano questo secondo modello (MOD.2) sono le seguenti:

- Alpi Occidentali

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.26)$$

$$\lambda = 0,0468 * P - 30,31 \quad (4.27)$$

$$\lambda - \varepsilon = 0,0002 * (P * Hmed)^{0,7739} \quad (4.28)$$

$$\beta = 2,1983 * \left(\frac{q_{salto}}{q_{max}} \right)^{0,4835} [\theta \leq 129] \quad (4.29)$$

$$Q_{salto} = 0,2549 * Q_{max}^{0,6836} \quad (4.30)$$

$$\beta = 0,0297 * Hmed^{0,429} [\theta > 129] \quad (4.31)$$

- Appennino

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.32)$$

$$\lambda = 0,0212 * P - 12,17 \quad (4.33)$$

$$\lambda - \varepsilon = 0,0002 * (P * Hmed)^{0,8068} \quad (4.34)$$

Se $\varepsilon > 0$

$$\beta = 0,1033 * \left(\frac{q_{salto}}{q_{max}} \right)^{-0,5375} [\theta \leq 135] \quad (4.35)$$

$$Q_{salto} = 0,0677 * Q_{max}^{0,8914} \quad (4.36)$$

$$\beta = 0,2456 * Hmed^{0,121} \quad [\theta > 135] \quad (4.37)$$

Se $\varepsilon = 0$

$$\beta = 0,2456 * Hmed^{0,121} \quad (4.38)$$

Nonostante l'introduzione di un β diverso per le brevi durate questo secondo modello ha portato a risultati meno precisi rispetto al precedente come si può vedere dagli istogrammi seguenti (fig. 4.4 e fig.4.5).

In generale i risultati di questo studio sono buoni, ma bisogna ricordare che sono stati esclusi a priori tre bacini del Piemonte e inoltre tra i risultati degli Appennini non figura il bacino del Correcchio (molto poco esteso e fortemente torrentizio) in quanto l'errore relativo supererebbe il 100%.

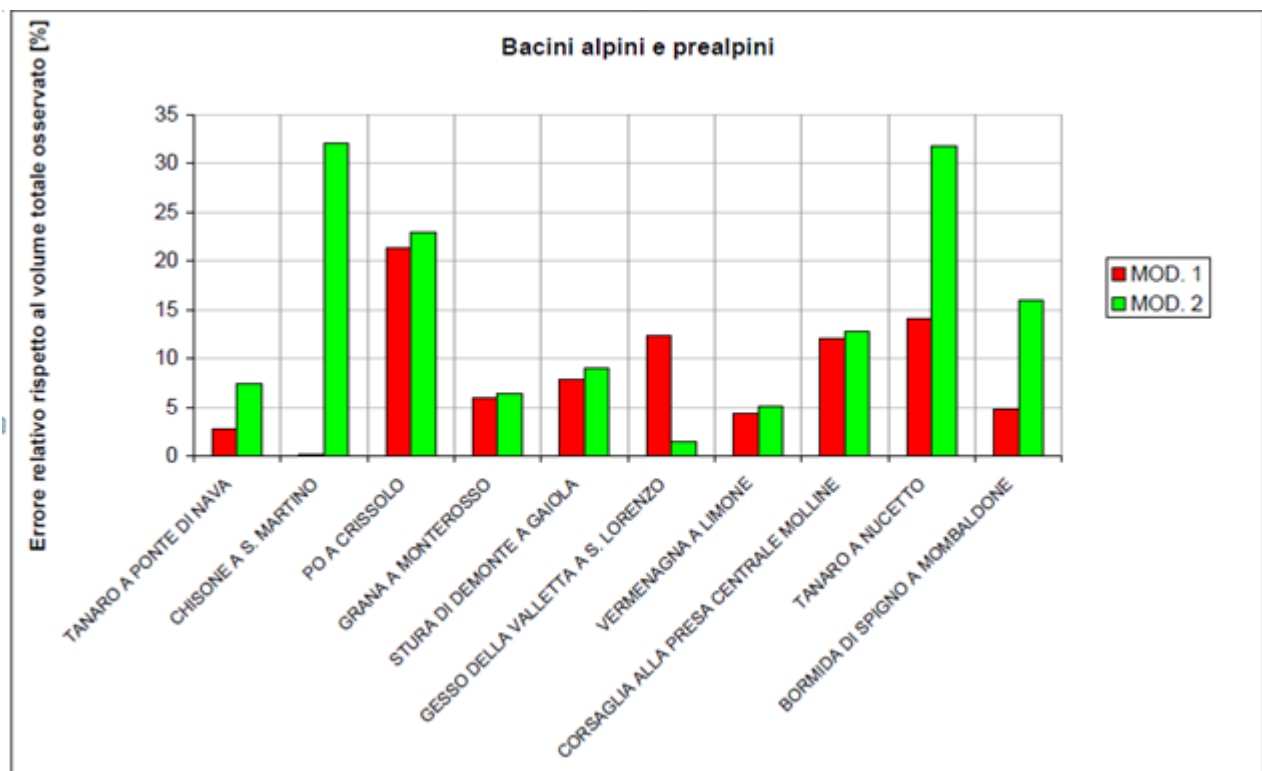


Fig. 4.5 Errori relativi rispetto ai volumi totali osservati per i bacini alpini e prealpini

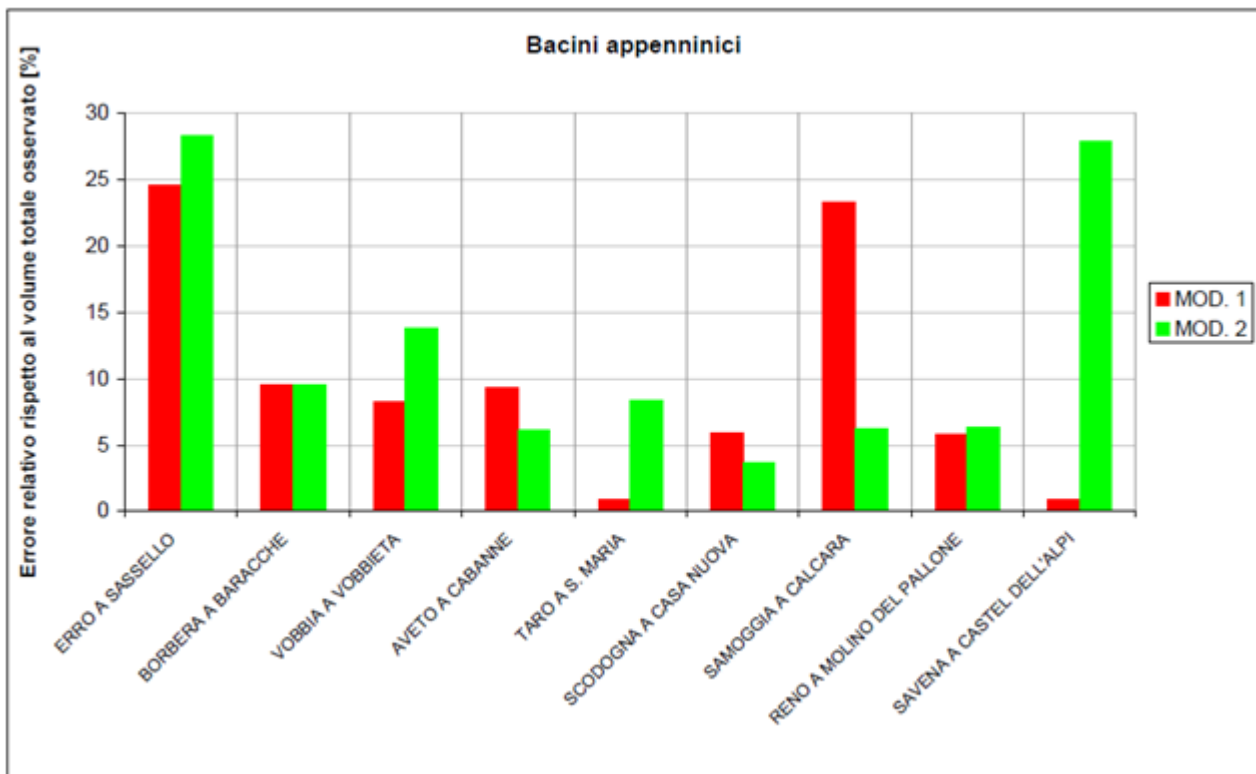


Fig. 4.6 Errori relativi rispetto ai volumi totali osservati per i bacini appenninici

4.3 Trentino - Alto Adige e Veneto

Crapella ha applicato l'approccio della regionalizzazione alle aree comprese tra il Veneto e il Trentino Alto-Adige. All'interno di questo studio sono stati analizzati piccoli bacini (indicativamente inferiori a 400 Km^2) non regolati. In fig. 4.6 è riportata una mappa dei bacini considerati.

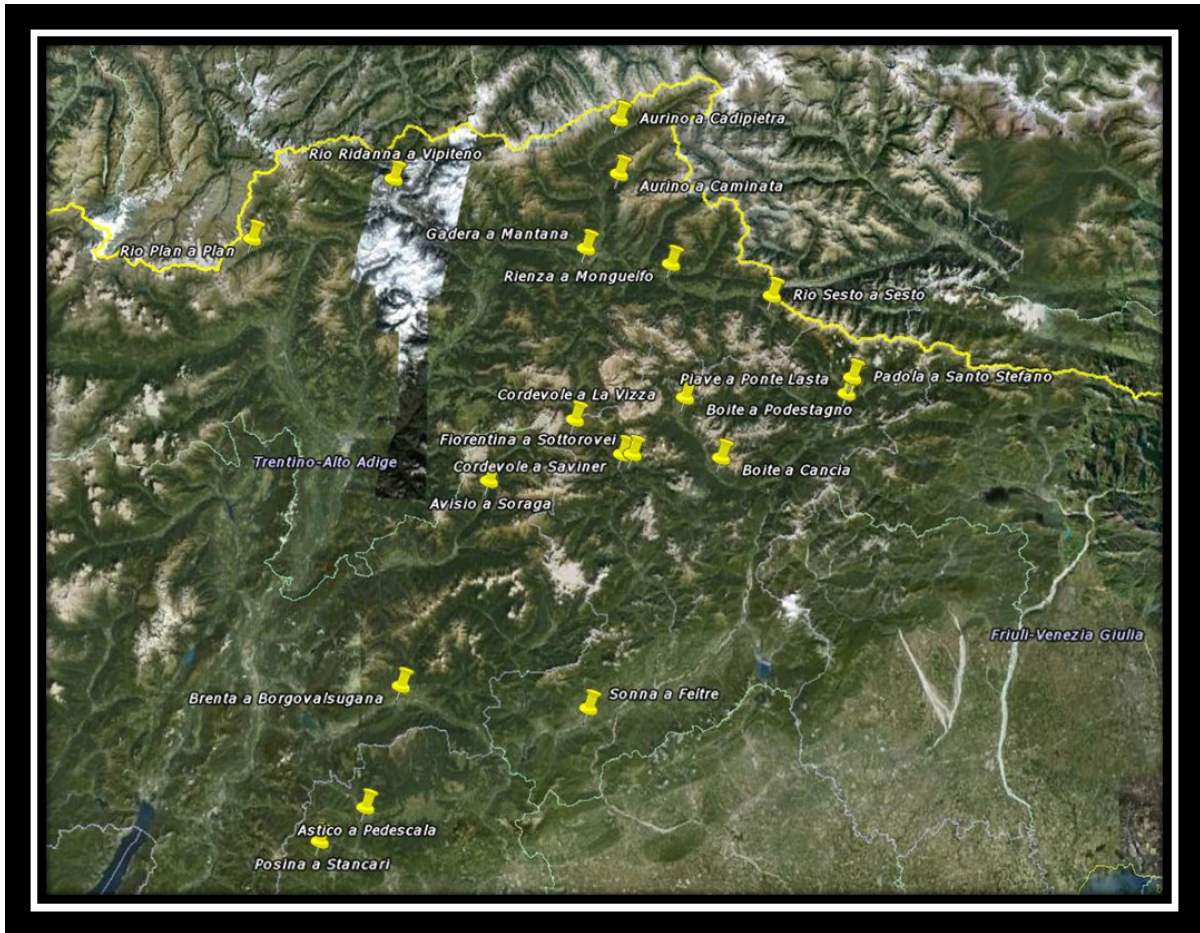


Fig. 4.7 Sezioni idrometriche considerate per i settori veneto e trentino

Anche in questo caso considerando l'intera serie di dati non sono state individuate delle correlazioni significative tra i parametri della Weibull e le grandezze caratteristiche dei bacini.

L'intera area è stata perciò suddivisa in due zone: Adige-Brenta e bacino del Piave. In questo modo si sono trovate delle relazioni soddisfacenti.

La forma delle tre relazioni è la stessa utilizzata da Cozzi: λ correlato linearmente alla pioggia media; $(\lambda - \varepsilon)$ correlato al prodotto tra la pioggia media e la quota media; β correlato con la quota media. Di seguito si riportano le relazioni considerate per la costruzione dei modelli regionali.

- Adige e Brenta

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \tag{4.39}$$

$$\lambda = 0,0742 * P - 46,023 \tag{4.40}$$

$$\lambda - \varepsilon = 5 * 10^{-8} * (P * Hmed)^{1,3772} \quad (4.41)$$

$$\beta = 0,0001 * Hmed^{1,1854} \quad (4.42)$$

- Piave

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.43)$$

$$\lambda = 0,0377 * P - 18,079 \quad (4.44)$$

$$\lambda - \varepsilon = 5 * 10^{-7} * (P * Hmed)^{1,1834} \quad (4.45)$$

$$\beta = 0,0168 * Hmed^{0,5172} \quad (4.46)$$

E' stata presa in considerazione anche qui la possibilità di utilizzare β_1 e β_2 , tuttavia, per i bacini in esame il risultato è stato una sostanziale uguaglianza tra i due valori. Pertanto si è preferito procedere mantenendo un unico valore di β .

I risultati sono decisamente buoni per quanto riguarda l'area del Piave. Per i bacini dell'Adige e del Brenta i risultati sono discreti ma vi sono due bacini in cui l'errore relativo tra volume totale osservato e stimato supera il 50 %.

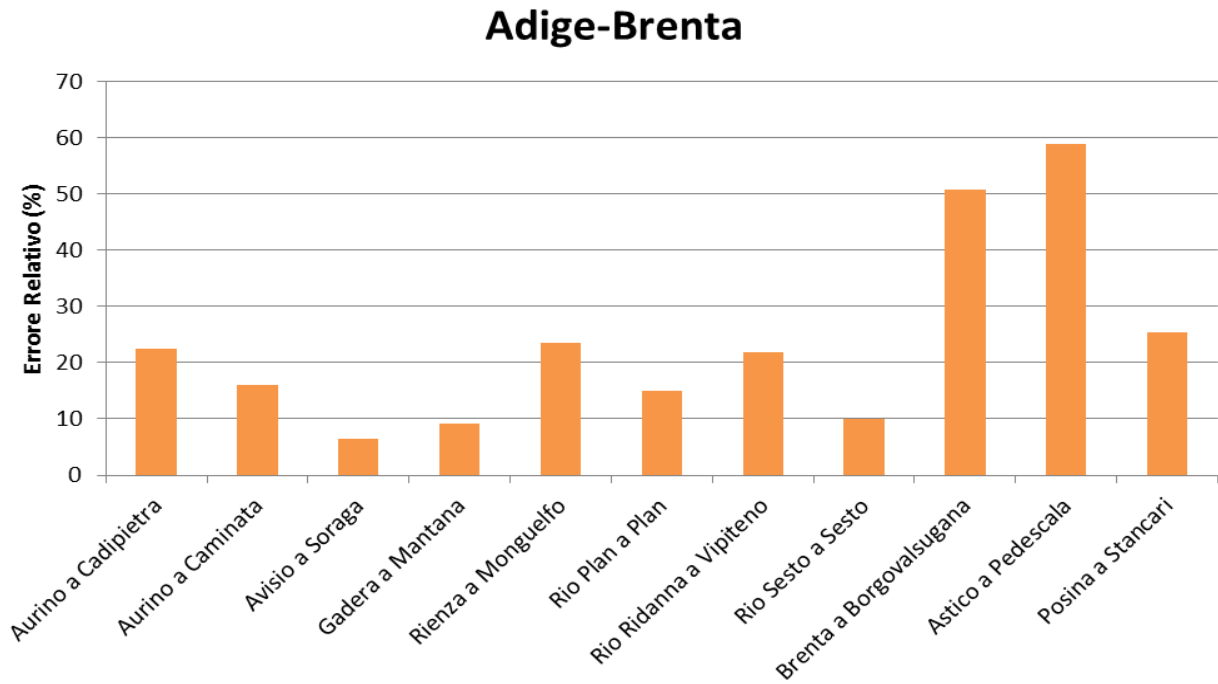


Fig. 4.8 Errore relativo tra volume totale osservato e volume totale stimato attraverso il modello per l'area Adige-Brenta

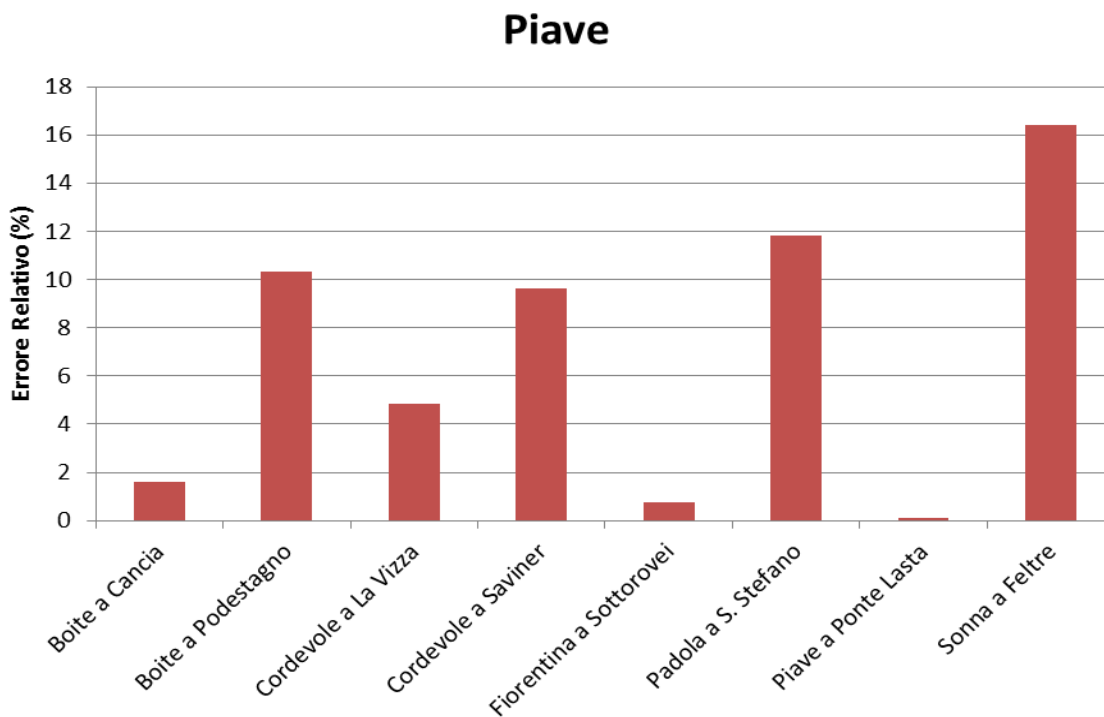


Fig. 4.9 Errore relativo tra volume totale osservato e volume totale stimato attraverso il modello per l'area Piave

Analisi ed elaborazione dei dati

In questo capitolo sono riportati nel dettaglio i dati considerati. Tali dati vengono successivamente elaborati con lo scopo di costruire le curve di durata.

5.1 Scelta dei dati

L'intera serie dei dati disponibili copre gran parte del territorio alpino e prealpino italiano nonché parte dell'Appennino settentrionale e fa particolare riferimento ai piccoli bacini non regolati.

In quest'ottica, per quanto riguarda la Lombardia, si è quindi deciso di escludere dall'analisi i dati riguardanti i grandi bacini fluviali aventi un'estensione superiore agli 800 km² e in generale i bacini interessati da importanti opere di regolazione.

Infatti la presenza di invasi artificiali, opere di presa e/o di restituzione può modificare in maniera sostanziale il regime naturale delle portate fluviali. L'effetto di tali utilizzazioni è di duplice natura: nei tratti fluviali a valle delle sezioni di presa, ma a monte di quelle di restituzione, si osserva una ovvia diminuzione della portata media ed una accentuazione della variabilità attorno a tale media; nei tratti a valle delle sezioni di restituzione la portata media annua non subisce variazioni di rilievo (si considerano infatti opere di regolazione prevalentemente annuali), ma si osserva una diminuzione delle portate massime e un aumento delle portate minime, con il conseguente "spianamento" delle curve di durata.

Il modello che si intende sviluppare all'interno di questo elaborato dovrebbe essere quindi applicabile a tutti i piccoli bacini del Norditalia non soggetti a regolazione.

Il monitoraggio dei dati climatici fino al 1997 è stato prevalentemente gestito dal Servizio Idrografico e Mareografico Italiano (SIMI), che era organizzato su base territoriale in compartimenti e pubblicava a scadenza annuale gli Annali Idrologici.

Gli Annali Idrologici contengono, in due volumi, (Parte prima e Parte seconda) i risultati ottenuti negli studi idrogeologici e condotti dal Servizio Idrografico e Mareografico Italiano relativi al territorio di competenza del singolo compartimento. Le suddette pubblicazioni hanno raggiunto nel tempo un notevole grado di accuratezza, sia per la mole del materiale e per la sollecitudine con cui è stato pubblicato, sia per i criteri rigorosamente scientifici che hanno ispirato l'elaborazione. Gli Annali Idrologici Parte I comprendono la *termometria* e la *pluviometria*, mentre la Parte II contiene l'*idrometria*, la *freatimetria* e la *torbiometria*. In particolare la sezione C (*Portate e Bilanci Idrologici*) della Parte II presenta per ogni stazione una tabella in cui sono riportate le portate medie giornaliere in [m³/s] registrate nell'anno di riferimento (vedi fig. 5.1). Oltre alle medie giornaliere sono riportati i valori massimi, medi e minimi di portata media giornaliera riferiti rispettivamente ai singoli mesi, all'anno di riferimento e all'intera serie di dati registrati dall'entrata in funzione della stazione. Per ognuno di questi periodi di riferimento sono inoltre riportati i valori di deflusso specifico [mm], di afflusso in termini di precipitazioni [mm] e il conseguente coefficiente di deflusso derivante dal rapporto tra le precedenti grandezze. Infine sono fornite le caratteristiche della stazione e del relativo bacino idrografico (area del bacino, altitudine massima e media, quota dello zero idrometrico, etc.). Un esempio di Annale Idrologico si può osservare nelle fig. 5.1 e 5.2.

III. - BRENTA a BORGO VALSUGANA (Mr)

CARATTERISTICHE DELLA STAZIONE: Bacino di dominio 214 kmq. (parte permeabile 54%) aree glaciali 0 kmq; altitudine max. 2361 m.s.m.; media 935 m.s.m.; zero idrometrico 375.89 m.s.m.; distanza dalla foce km 143 circa; inizio osservazioni 1955; inizio misure 1955.

PORTATE MEDIE GIORNALIERE in mc/s												
GIORNO	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
1	3,53	3,10	4,30	6,70	10,00	12,40	5,70	3,98	2,82	6,05	4,93	3,56
2	3,53	3,10	4,46	7,83	9,70	11,70	5,50	3,98	2,69	10,20	4,93	7,55
3	3,53	3,10	4,30	10,70	10,30	12,00	5,13	3,83	2,69	11,80	4,71	9,23
4	3,53	3,10	4,30	8,85	12,00	16,10	4,96	3,68	2,69	14,10	4,71	7,30
5	3,53	3,10	4,46	8,07	15,40	17,90	4,79	3,68	2,82	16,30	4,71	6,05
6	3,53	3,24	4,46	7,83	14,60	17,60	4,62	3,83	3,53	10,80	4,93	5,82
7	3,53	3,24	4,46	7,83	15,00	15,00	4,30	3,68	2,96	8,94	4,93	5,59
8	3,53	3,24	4,46	7,83	15,00	13,50	4,14	3,53	2,96	8,38	4,71	5,59
9	3,53	3,38	4,30	8,85	14,30	12,40	3,98	4,30	2,96	7,82	4,71	5,59
10	3,53	3,53	4,30	9,40	13,50	12,00	3,83	5,90	3,10	7,05	4,71	5,59
11	3,38	3,53	4,46	10,00	12,40	11,30	3,83	4,30	3,10	7,05	4,93	5,37
12	3,38	3,68	4,46	10,00	12,00	10,30	3,68	3,68	3,10	6,80	4,93	5,15
13	3,38	3,68	4,46	10,00	11,70	9,70	3,53	3,68	3,10	6,55	4,71	4,93
14	3,38	3,53	4,46	10,30	12,00	9,70	3,53	3,68	3,10	6,30	4,93	4,93
15	3,38	3,53	4,46	11,30	12,00	10,00	4,14	3,53	3,53	6,30	4,93	4,50
16	3,24	3,38	4,46	12,00	17,20	9,70	3,68	3,38	4,79	6,30	4,50	4,30
17	3,10	3,38	4,62	12,40	18,70	9,12	3,83	3,24	4,14	6,05	6,05	4,50
18	3,10	3,38	4,62	11,00	16,10	8,85	3,98	3,10	4,96	5,82	5,15	4,71
19	3,10	3,38	4,62	11,00	15,70	8,32	4,14	3,10	8,94	5,82	4,93	5,82
20	3,10	3,38	4,62	11,00	17,20	8,07	4,14	3,10	6,05	5,59	4,93	5,82
21	3,10	3,24	4,62	11,30	26,10	7,83	4,14	3,38	5,37	5,59	4,50	5,37
22	2,96	3,24	4,62	12,00	21,60	7,59	4,14	3,38	6,05	5,82	4,50	5,15
23	2,96	3,38	4,62	13,10	20,20	7,35	4,30	3,38	6,05	5,82	4,50	5,15
24	3,10	3,53	4,79	13,10	16,50	7,35	4,46	3,53	13,30	5,82	4,50	5,15
25	3,10	4,30	5,13	13,10	14,60	7,12	4,62	3,24	8,66	5,59	4,50	4,71
26	3,10	6,30	5,50	12,80	12,80	6,70	4,46	3,24	7,05	5,37	4,50	4,50
27	3,24	6,30	5,13	13,10	13,50	6,30	4,46	3,38	6,30	5,59	4,71	4,50
28	3,24	4,62	5,13	13,10	15,40	6,30	4,30	3,53	6,05	5,37	4,10	4,50
29	3,24	4,30	6,30	11,70	15,00	6,10	4,14	3,24	5,82	5,37	3,91	4,50
30	3,10		8,85	10,70	14,60	5,90	4,14	3,10	5,82	5,15	3,73	4,71
31	3,10		7,12		13,50		3,98	2,96		4,93		4,71

Fig. 5.1 Annale Idrologico della stazione di Brenta a Borgo Valsugana – Caratteristiche della stazione e portate medie giornaliere.

ELEMENTI CARATTERISITICI PER L'ANNO 1984													
	ANNO	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Q max (mc/s)	26,10	3,53	6,30	8,85	13,10	26,10	17,90	5,70	5,50	13,30	16,30	6,05	9,23
Q media (mc/s)	6,44	3,29	3,66	4,87	10,56	14,79	10,14	4,28	3,59	4,82	7,24	4,71	5,32
Q minima (mc/s)	2,69	2,96	3,10	4,30	6,70	9,70	5,90	3,53	2,96	2,69	4,93	3,73	3,56
Q media (l/s.kmq)	30,09	15,39	17,11	22,74	49,36	69,13	47,38	19,98	16,75	22,51	33,83	22,03	24,85
Deflusso (mm)	951,91	41,21	42,87	60,90	127,94	185,15	122,82	53,52	44,87	58,34	90,62	57,10	66,56
Afflusso (mm)	1157,09	21,00	91,31	55,61	74,48	223,52	76,31	56,52	123,47	162,16	109,23	56,26	107,22
Coeff. di deflusso	0,82	1,96	0,47	1,10	1,72	0,83	1,61	0,95	0,36	0,36	0,83	1,01	0,62

ELEMENTI CARATTERISITICI PER IL PERIODO 1956-71; 1975-83													
Q max (mc/s)	59,40	14,50	9,96	18,20	20,90	22,30	15,10	19,10	17,90	50,10	57,00	59,40	22,00
Q media (mc/s)	4,95	4,33	3,75	4,21	5,60	6,26	6,01	4,61	3,90	4,36	4,61	6,28	5,44
Q minima (mc/s)	0,87	1,00	0,87	0,87	1,77	2,05	2,81	1,65	1,68	1,34	0,88	1,06	1,41
Q media (l/s.kmq)	23,12	20,24	17,54	19,68	26,19	29,24	28,10	21,54	18,21	20,38	21,56	29,34	25,41
Deflusso (mm)	729,94	54,20	42,82	52,71	67,88	78,32	72,83	57,70	48,78	52,82	57,74	76,06	68,06
Afflusso (mm)	1124,69	54,07	49,01	70,26	82,87	118,53	108,67	97,59	106,48	96,05	129,49	129,10	82,57
Coeff. di deflusso	0,65	1,00	0,87	0,75	0,82	0,66	0,67	0,59	0,46	0,55	0,45	0,59	0,82

Fig. 5.2 Annale Idrologico della stazione di Brenta a Borgo Valsugana – Elementi caratteristici

Purtroppo a partire dagli anni '80 circa, il Servizio Idrografico ha iniziato a registrare un progressivo e generalizzato rallentamento nella pubblicazione degli Annali Idrologici, fino ad arrivare alla cessazione; ciò ha inevitabilmente comportato la sua riorganizzazione presso le Regioni al fine di garantire la raccolta sistematica, l'archiviazione e l'elaborazione delle osservazioni e delle misure idrologiche.

Successivamente all'entrata in vigore del DPCM 24/07/2002, le stazioni di monitoraggio climatico sono confluite nell'ambito delle competenze dei diversi "Servizi Meteorologici Regionali" delle Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA). Tuttavia anche queste sono in forte ritardo nella pubblicazione dei dati, infatti non tutti gli anni di osservazione sono stati pubblicati.

All'interno di questo elaborato le misure di portata media giornaliera, così come le informazioni caratteristiche dei bacini, provengono prevalentemente dagli Annali Idrologici; per alcuni bacini si è invece fatto riferimento a dati reperibili presso le ARPA e a dati forniti da Enti privati che si occupano per lo più di produzione di energia idroelettrica.

Nella tabella seguente sono riportati, per ogni stazione di misura, i periodi di osservazione, il numero complessivo di anni di osservazione e la fonte dei dati.

	BACINO	PERIODO	ANNI	FONTE
O V E S T A L P I	San Bernardino a Santino	1957-1969	13	SIMI
	Mastallone a Ponte Folle	1935-1944; 1946-1965	30	SIMI
	Cervo a Passobreve	1937-1944; 1951-1955	13	SIMI
	Chisone a San Martino	1942-1971	30	SIMI
	Po a Crissolo	1942-1943; 1950-1951; 1965; 1957-1958; 1962; 1964-1965; 1967-1968; 1970	13	SIMI
	Grana a Monterosso	1942-1973; 1975-1979	37	SIMI
	Stura di Demonte a Gaiola	1935-1944; 1958-1965	18	SIMI
	Gesso della Valletta a San Lorenzo	1952; 1954; 1956; 1958; 1962; 1964	6	SIMI
	Vermenagna a Limone	1941-1956	16	SIMI
	Corsaglia alla Presa Centrale Molline	1942-1959	18	SIMI
	Tanaro a Nucetto	1942-1944; 1947-1965	22	SIMI
	Bormida di Spigno a Mombaldone	1995-1996; 1999; 2001-2008	11	Arpa Piemonte
A P P E N N I	Erro a Sassello	1945-1960	16	SIMI
	Borbera a Baracche	1938-1943; 1950-1961	18	SIMI
	Vobbia a Vobbietta	1956-1968	13	SIMI
	Aveto a Cabanne	1944-1947; 1949-1952; 1954-1968	23	SIMI
	Taro a Santa Maria	1953-1974	22	SIMI
	Scodogna a Casa Nuova	1965-1973	9	SIMI
	Samoggia a Calcara	1938; 1959-1979	22	SIMI
	Reno a Molino del Pallone	1951-1976	26	SIMI
	Savena a Castel dell'Alpi	1956-1975	20	SIMI
	Quaderna a Palesio	1951-1974	24	SIMI
Correcchio a Contrada "Il Portone"	1949-1974	26	SIMI	
L O M B A	Livrio a Crocetta	1984-1986	3	Sondel SpA
	Albano a Garzeno	1941-1960	20	Sondel SpA
	Roasco di Eita a S. Val.	1965-1995	31	AEM SpA
	Mallero a Curlo	1982-1991	10	Enel SpA
	Oglio a Temù	1926-1940	15	SIMI

R D I A	Chiese a Ponte Cimego	1930-1941	12	SIMI
	Serio a Ponte Cene	1939-1971	33	SIMI
	Oglio a Capo di Ponte	1926-1936	11	SIMI
A D I G E	Aurino a Cadipietra	1928-1933; 1935-1943; 1959-1972; 1976-1980; 1983; 1985-2009	60	SIMI
	Aurino a Caminata	1979-1984; 1989-2009	27	SIMI
	Avisio a Soraga	1955-1972; 1975-1983; 1985-2009	52	SIMI
	Gadera a Mantana	1927-1933; 1935-1943; 1946-1965; 1979-1982; 1985-2009	65	SIMI
E B R E N T A	Rienza a Monguelfo	1930-1943; 1946-1957; 1959-1960; 1962-1972; 1975-1979; 1981-2009	73	SIMI
	Rio Plan a Plan	1959-1973; 1986; 1994-2009	32	SIMI
	Rio Ridanna a Vipiteno	1956-1973; 1975-2009	53	SIMI
	Rio Sesto a Sesto	1998-2009	12	SIMI
	Brenta a Borgovalsugana	1956-1973; 1975-1988; 1995-2009	47	SIMI
	Astico a Pedescaia	1987-2000; 2003-2009	21	SIMI
P I A V E	Posina a Stancari	1950-1957; 1987; 1989-2000; 2003-2006	25	SIMI
	Boite a Cancia	1986-2009	24	SIMI
	Boite a Podestagno	1944-1950; 1952-1955; 1993-2009	28	SIMI
	Cordevole a La Vizza	1985-1994; 1996-2000; 2002-2009	23	SIMI
	Cordevole a Saviner	1985-1987; 1994; 1998; 2001-2009	14	SIMI
	Fiorentina a Sottorovei	1997-1998; 2003-2008	8	SIMI
	Padola a Santo Stefano	1986-1988; 1993-1994; 1997-2000; 2003-2009	16	SIMI
	Piave a Ponte Lasta	1933-1964; 1990-1991; 1994-2006	47	SIMI
Sonna a Feltre	1990-2005; 2007-2009	19	SIMI	

Tab. 5.1 Fonti dei dati

Si riportano di seguito in tab. 5.3 le principali grandezze caratteristiche dei bacini, ovvero:

A = estensione totale del bacino alla sezione di chiusura considerata [km^2];

h_{med} = quota media del bacino [m];

i_m = inclinazione media del bacino [-];

P = precipitazione media annua [mm/anno];

La pendenza media i_m è stata stimata con la formula approssimata già utilizzata nello studio del Politecnico di Milano per i bacini lombardi:

$$i_m = \frac{h_{\text{max}} - h_{\text{min}}}{\sqrt{A}} \quad (5.1)$$

dove h_{max} e h_{min} sono rispettivamente le quote massima e minima del bacino espresse in metri sul livello del mare.

	Bacino	A [km ²]	hmed [m]	i_m [-]	P [mm/anno]
O V E S T A L P I	San Bernardino a Santino	125	1230	0,186	2169
	Matallone a Ponte Folle	149	1350	0,165	1936
	Cervo a Passobreve	74	1495	0,230	1803
	Chisone a San Martino	581	1751	0,120	1050
	Po a Crissolo	37	2235	0,428	1130
	Grana a Monterosso	102	1540	0,192	1176
	Stura di Demonte a Gaiola	562	1817	0,112	1219
	Gesso della Valletta a San Lorenzo	110	2082	0,230	1357
	Vermegnana a Limone	57	1679	0,239	1364
	Corsaglia alla Presa Centrale Molline	89	1530	0,214	1308
	Tanaro a Nucetto	375	1227	0,114	1157
	Bormida di Spigno a Mombaldone	395	614	0,042	899
	A P P E N N I N I	Erro a Sassello	96	591	0,098
Borbera a Baracche		202	880	0,096	1229
Vobbia a Vobbietta		52	733	0,150	1461
Aveto a Cabanne		43	1008	0,082	2289
Taro a Santa Maria		30	1065	0,187	2179
Scodogna a Casa Nuova		11	270	0,118	926
Samoggia a Calcara		170	375	0,066	947
Reno a Molino del Pallone		89	951	0,127	2014
Savena a Castel dell'Alpi		12	1005	0,161	1489
Quaderna a Palesio		22	285	0,110	861
Correcchio a Contrada "Il Portone"	6	136	0,100	848	
L O M B A R D I A					
	Livrio a Crocetta	10	2123	0,421	1533
	Albano a Garzeno	35	1049	0,270	1802
	Roasco di Eita a S. Val.	63	2281	0,272	904
	Mallero a Curlo	90	2315	0,265	1228
	Oglio a Temù	119	2204	0,221	1777
	Chiese a Ponte Cimego	235	1854	0,201	1321
	Serio a Ponte Cene	455	1335	0,127	1690
Oglio a Capo di Ponte	777	1857	0,115	1205	
A D I G E E B R					
	Aurino a Cadipietra	155	2160	0,198	1250
	Aurino a Caminata	416	2130	0,130	1142
	Avisio a Soraga	208	2070	0,148	975
	Gadera a Mantana	387	1860	0,118	882
	Rienza a Monguelfo	270	1880	0,136	953
	Rio Plan a Plan	48	2398	0,276	1300
	Rio Ridanna a Vipiteno	206	1918	0,175	1150
Rio Sesto a Sesto	65	1975	0,222	916	

E	Brenta a Borgovalsugana	214	935	0,136	1017
N	Astico a Pedescaia	136	1168	0,136	800
T	Posina a Stancari	116	1106	0,170	900
A					
P	Boite a Cancia	310	1828	0,133	1150
	Boite a Podestagno	81	2264	0,209	1119
I	Cordevole a La Vizza	7	2251	0,495	1250
A	Cordevole a Saviner	110	1895	0,203	1006
V	Fiorentina a Sottorovei	56	1858	0,278	1022
E	Padola a S. Stefano	134	1699	0,183	1131
	Piave a Ponte Lasta	357	1664	0,116	1206
	Sonna a Feltre	120	731	0,156	1050

Tab. 5.2 Principali grandezze caratteristiche dei bacini oggetto di studio

5.2 Costruzione delle curve di durata

Analizzando le portate medie giornaliere sono state determinate le portate medie giornaliere specifiche e in seguito si è individuata per ogni singolo anno la curva di durata ordinando in maniera decrescente il campione di 365 valori di portata media giornaliera specifica, ottenendo cioè, per ogni anno, il valore di portata che viene eguagliato o superato per ogni durata.

I valori così ordinati sono stati successivamente mediati sull'intero periodo di osservazione disponibile per ogni stazione ed è stato possibile ricavare la curva di durata media delle portate propria di ciascun bacino.

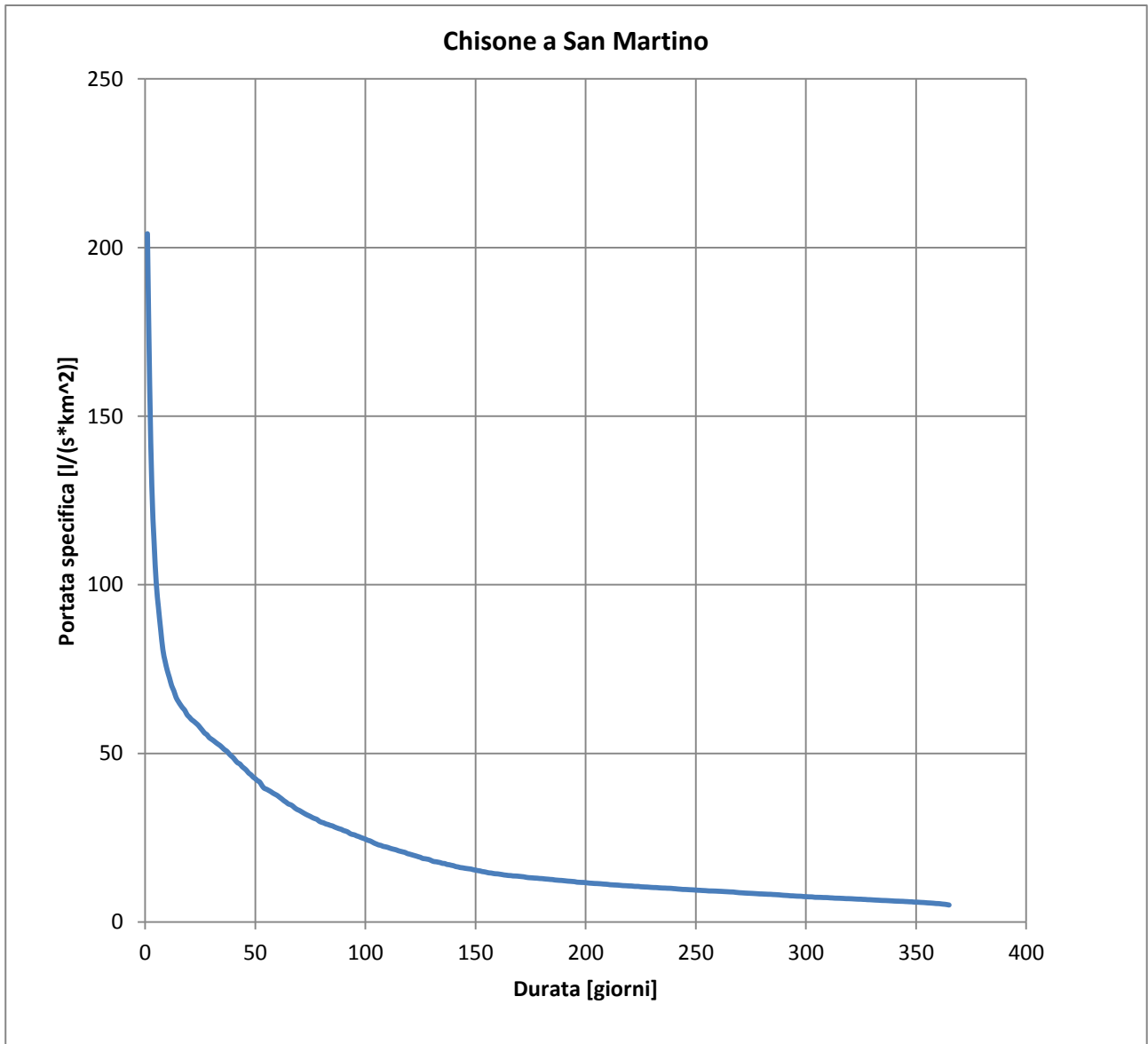


Fig. 5.3 Curva di durata media osservata del Chisone a San Martino

Successivamente, per ciascun bacino, si è utilizzata la formula di Weibull a tre parametri per la stima della curva di durata media delle portate. La formula di Weibull, come già illustrato in precedenza, fa riferimento ai parametri λ , ε e β . Per la stima di tali parametri è stato utilizzato il metodo dei momenti:

$$\mu(q) = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon)\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \tag{5.2}$$

$$\sigma(q) = (\lambda - \varepsilon) \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{5.3}$$

$$\gamma(q) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{\beta}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (5.4)$$

dove $\mu(q)$ rappresenta la media della curva di durata media osservata, mentre $\sigma(q)$ e $\gamma(q)$ rappresentano rispettivamente la deviazione standard e il coefficiente di asimmetria della stessa.

Nella tabella seguente sono riportate, per ogni curva di durata osservata, le medie, le deviazioni standard, e i coefficienti di asimmetria.

	Bacino	μ [l/(s*km2)]	σ [l/(s*km2)]	γ [-]
O V E S T A L P I	San Bernardino a Santino	55,36	91,99	5,97
	Mastallone a Ponte Folle	50,90	92,75	7,06
	Cervo a Passobreve	46,29	58,89	3,72
	Chisone a San Martino	21,65	22,52	3,33
	Po a Crissolo	31,09	23,40	2,71
	Grana a Monterosso	26,76	27,72	3,33
	Stura di Demonte a Gaiola	32,06	21,58	1,53
	Gesso della Valletta a San Lorenzo	40,82	38,06	2,54
	Vermegnana a Limone	35,78	40,61	3,72
	Corsaglia alla Presa Centrale Molline	31,21	37,54	2,96
	Tanaro a Nucetto	25,06	34,76	5,45
	Bormida di Spigno a Mombaldone	17,86	36,38	6,91
	A P P E N N I N I	Erro a Sassello	27,98	51,88
Borbera a Baracche		24,78	36,35	4,59
Vobbia a Vobbietta		26,45	35,88	5,58
Aveto a Cabanne		57,94	114,19	4,97
Taro a Santa Maria		50,20	81,08	6,26
Scodogna a Casa Nuova		13,15	33,70	6,13
Samoggia a Calcara		11,09	31,23	7,64
Reno a Molino del Pallone		42,20	70,17	5,49
Savena a Castel dell'Alpi		30,66	58,01	4,68
Quaderna a Palesio		10,92	27,35	5,25
Correcchio a Contrada "Il Portone"		3,40	12,04	9,20
L O M B	Livrio a Crocetta	49,25	57,38	1,89
	Albano a Garzeno	49,69	61,56	2,56
	Roasco di Eita a S. Val.	33,96	37,00	1,84

A	Mallero a Curlo	46,45	46,51	1,52
R	Oglio a Temù	42,78	37,32	1,38
D	Chiese a Ponte Cimego	39,35	38,82	2,45
I	Serio a Ponte Cene	46,36	36,80	3,28
A	Oglio a Capo di Ponte	36,28	23,16	2,02
A				
D	Aurino a Cadipietra	39,63	37,08	1,58
I	Aurino a Caminata	34,93	32,10	1,37
G	Avisio a Soraga	26,34	16,25	1,66
E	Gadera a Mantana	20,64	10,67	1,51
E	Rienza a Monguelfo	22,95	9,81	0,97
B	Rio Plan a Plan	43,17	42,49	1,61
R	Rio Ridanna a Vipiteno	36,54	34,87	1,82
E	Rio Sesto a Sesto	22,12	17,28	2,50
N	Brenta a Borgovalsugana	21,90	10,78	2,02
T	Astico a Pedescala	25,22	43,75	5,72
A	Posina a Stancari	28,01	39,93	5,69
	Boite a Cancia	27,34	18,18	2,45
P	Boite a Podestagno	27,68	24,44	2,58
I	Cordevole a La Vizza	28,54	29,37	2,22
A	Cordevole a Saviner	23,36	22,77	2,65
V	Fiorentina a Sottorovei	21,67	18,94	4,17
E	Padola a S. Stefano	23,55	14,54	2,13
	Piave a Ponte Lasta	29,49	20,26	2,46
	Sonna a Feltre	26,03	24,72	6,99

Tab. 5.3 Curve di durata medie osservate: medie, deviazioni standard e coefficienti di asimmetria

In fig. 5.4 si può osservare che la curva di durata media stimata attraverso la distribuzione di Weibull a tre parametri riesce a interpretare con correttezza l'andamento reale della curva.

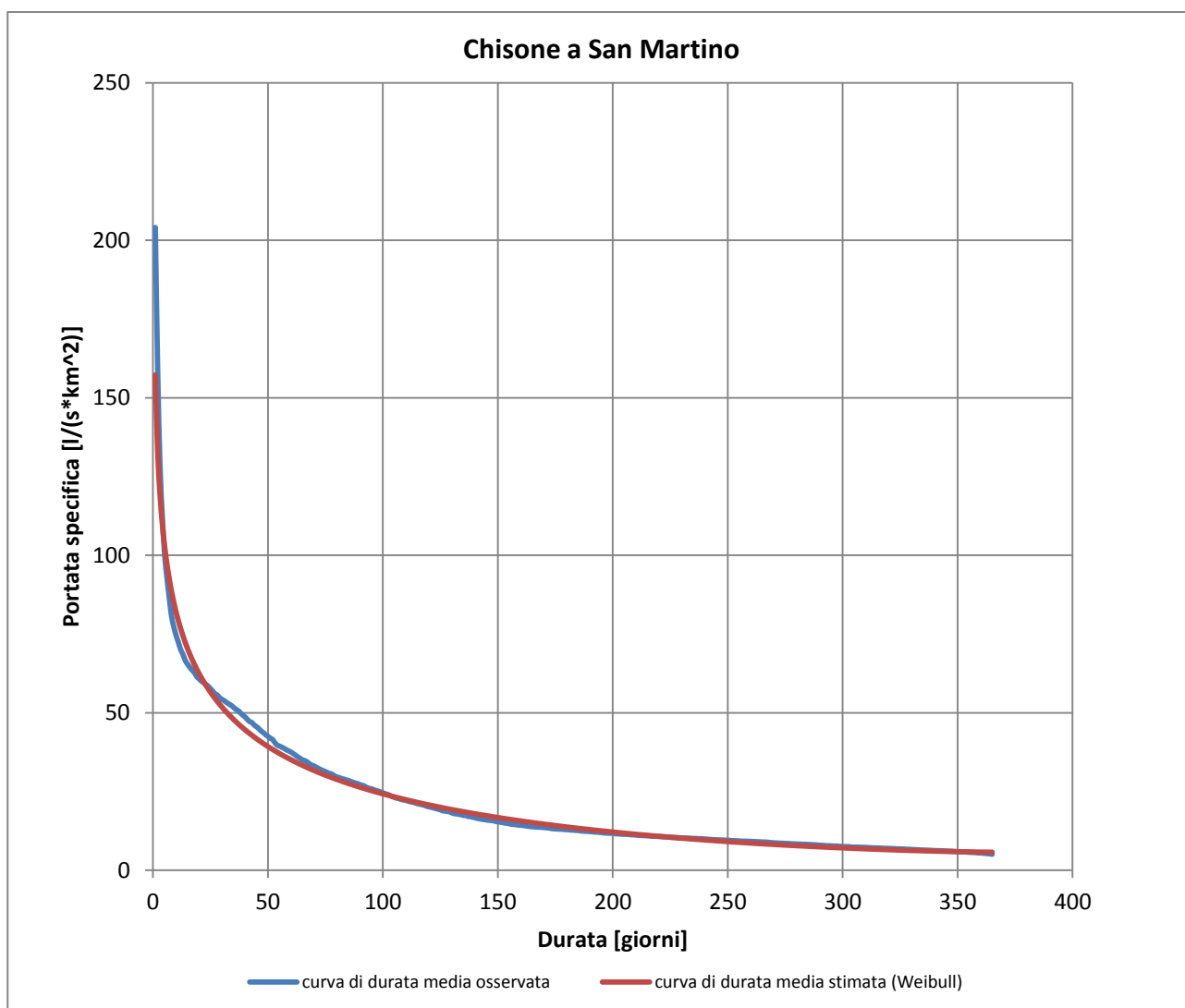


Fig. 5.4 Confronto tra la curva di durata media osservata e stimata attraverso la formula di Weibull a tre parametri per la stazione di Chisone a San Martino

5.3 Adimensionalizzazione delle portate misurate

Lo scopo finale di questo lavoro è quello di valutare la possibilità di definire in maniera più generale la dipendenza della curva di durata dai parametri geomorfologici e climatici. Gli studi precedenti hanno evidenziato che i parametri più significativi in questo contesto sono l'area [km^2], la piovosità media annua [$mm/anno$], l'inclinazione media [-] e la quota media del bacino [m]. I risultati fin qui ottenuti sono espressi in termini di portate specifiche [$l/(s \cdot km^2)$]; è stata effettuata, infatti, a una prima adimensionalizzazione dei dati rispetto all'area.

Si è quindi pensato di rendere i dati completamente adimensionali utilizzando il parametro più significativo: la pioggia media annua.

Se si analizzano le unità di misura si nota, infatti, che:

$$q = \left[\frac{l}{s * km^2} \right] \tag{5.5}$$

$$P = \left[\frac{mm}{anno} \right] \tag{5.6}$$

$$\frac{q}{P} = \left[\frac{l}{s * km^2} * \frac{anno}{mm} \right] = \left[\frac{m^3 * 10^{-3}}{s * m^2 * 10^6} * \frac{anno}{m * 10^{-3}} * \frac{31536000 s}{anno} \right] = 31,536 [-] \tag{5.7}$$

Concretamente è stata eseguita l'adimensionalizzazione delle medie e delle deviazioni standard delle curve di durata medie osservate seguendo lo schema indicato (le medie e le deviazioni standard sono state moltiplicate per 31,536 e divise per la pioggia media annua). Il coefficiente di asimmetria, già adimensionale, non ha invece subito modifiche.

	Bacino	μ [-]	σ [-]	γ [-]
O V E S T A L P I	San Bernardino a Santino	0,8050	1,3375	5,9689
	Mastallone a Ponte Folle	0,8294	1,5112	7,0634
	Cervo a Passobreve	0,8099	1,0304	3,7232
	Chisone a San Martino	0,6502	0,6763	3,3265
	Po a Crissolo	0,8675	0,6529	2,7146
	Grana a Monterosso	0,7178	0,7435	3,3296
	Stura di Demonte a Gaiola	0,8294	0,5583	1,5256
	Gesso della Valletta a San Lorenzo	0,9489	0,8848	2,5352
	Vermegnana a Limone	0,8271	0,9386	3,7179
	Corsaglia alla Presa Centrale Molline	0,7523	0,9051	2,9581
	Tanaro a Nucetto	0,6831	0,9478	5,4494
	Bormida di Spigno a Mombaldone	0,6264	1,2761	6,9133
A P P E N	Erro a Sassello	0,7354	1,3635	5,4880
	Borbera a Baracche	0,6359	0,9329	4,5886
	Vobbia a Vobbietta	0,5711	0,7746	5,5769
	Aveto a Cabanne	0,7983	1,5733	4,9741
	Taro a Santa Maria	0,7266	1,1737	6,2553
	Scodogna a Casa Nuova	0,4478	1,1477	6,1329

N	Samoggia a Calcara	0,3694	1,0402	7,6404
I	Reno a Molino del Pallone	0,6609	1,0988	5,4869
N	Savena a Castel dell'Alpi	0,6493	1,2284	4,6796
I	Quaderna a Palesio	0,4000	1,0023	5,2461
	Correcchio a Contrada "Il Portone"	0,1264	0,4480	9,2000
L	Livrio a Crocetta	0,9999	0,9354	1,5769
O	Albano a Garzeno	0,9645	0,8864	1,3672
M	Roasco di Eita a S. Val.	0,8521	0,5257	1,6596
B	Mallero a Curlo	0,7380	0,3816	1,5132
A	Oglio a Temù	0,7595	0,3245	0,9707
R	Chiese a Ponte Cimego	1,0472	1,0308	1,6088
D	Serio a Ponte Cene	1,0022	0,9563	1,8203
I	Oglio a Capo di Ponte	0,7614	0,5945	2,5038
A	Aurino a Cadipietra	0,6792	0,3343	2,0200
D	Aurino a Caminata	0,9942	1,7246	5,7175
I	Avisio a Soraga	0,9814	1,3993	5,6881
G	Gadera a Mantana	0,7497	0,4985	2,4502
E	Rienza a Monguelfo	0,7801	0,6887	2,5766
E	Rio Plan a Plan	0,7200	0,7409	2,2226
B	Rio Ridanna a Vipiteno	0,7320	0,7135	2,6454
R	Rio Sesto a Sesto	0,6688	0,5847	4,1655
E	Brenta a Borgovalsugana	0,6569	0,4055	2,1312
N	Astico a Pedescala	0,7714	0,5300	2,4639
T	Posina a Stancari	0,7819	0,7425	6,9947
A	Boite a Cancia	1,0129	1,1802	1,8900
P	Boite a Podestagno	0,8696	1,0773	2,5600
I	Cordevole a La Vizza	1,1850	1,2910	1,8400
A	Cordevole a Saviner	1,1929	1,1944	1,5200
V	Fiorentina a Sottorovei	1,1731	1,0234	1,3800
E	Padola a S. Stefano	0,9394	0,9267	2,4500
	Piave a Ponte Lasta	0,8651	0,6867	3,2800
	Sonna a Feltre	0,9495	0,6061	2,0200

Tab. 5.4 Curve di durata medie osservate: medie, deviazioni standard e coefficienti di asimmetria adimensionali

In questo modo, applicando nuovamente il metodo dei momenti, è stato possibile ricavare dei parametri λ e $\lambda-\varepsilon$ di tipo adimensionale e costruire, considerando anche i parametri β precedentemente ricavati, una curva di durata media secondo l'espressione di Weibull in cui le portate sono da considerarsi completamente adimensionali.

	Bacino	β stimati [-]	$\lambda - \varepsilon$ stimati [-]	ε stimati [-]	λ stimati [-]	
O V E S T A L P I	San Bernardino a Santino	0,5250	0,3486	0,1653	0,5139	
	Mastallone a Ponte Folle	0,4854	0,3064	0,1813	0,4876	
	Cervo a Passobreve	0,6748	0,5145	0,1345	0,6491	
	Chisone a San Martino	0,7214	0,3888	0,1717	0,5604	
	Po a Crissolo	0,8185	0,4761	0,3367	0,8127	
	Grana a Monterosso	0,7210	0,4269	0,1919	0,6189	
	Stura di Demonte a Gaiola	1,1977	0,7076	0,1635	0,8711	
	Gesso della Valletta a San Lorenzo	0,8554	0,6957	0,1950	0,8907	
	Vermegnana a Limone	0,6754	0,4695	0,2113	0,6808	
	Corsaglia alla Presa Centrale Molline	0,7754	0,5985	0,0583	0,6568	
	Tanaro a Nucetto	0,5491	0,2819	0,2019	0,4838	
	Bormida di Spigno a Mombaldone	0,4901	0,2672	0,0715	0,3387	
	A P P E N N I N I	Erro a Sassello	0,5471	0,4015	0,0463	0,4478
		Borbera a Baracche	0,6003	0,3532	0,1049	0,4581
Vobbia a Vobbietta		0,5428	0,2229	0,1838	0,4066	
Aveto a Cabanne		0,5753	0,5327	-0,0503	0,4823	
Taro a Santa Maria		0,5134	0,2855	0,1821	0,4676	
Scodogna a Casa Nuova		0,5182	0,2875	-0,0915	0,1959	
Samoggia a Calcara		0,4688	0,1870	-0,0549	0,1321	
Reno a Molino del Pallone		0,5472	0,3236	0,1055	0,4291	
Savena a Castel dell'Alpi		0,5941	0,4527	-0,0408	0,4119	
Quaderna a Palesio		0,5597	0,3148	-0,1219	0,1929	
Correcchio a Contrada "Il Portone"		0,4338	0,0602	-0,0361	0,0241	
L O M B A R D I A		Livrio a Crocetta	1,1717	1,1540	-0,0925	1,0615
	Albano a Garzeno	1,2868	1,2228	-0,1673	1,0556	
	Roasco di Eita a S. Val.	1,1326	0,6216	0,2578	0,8794	
	Mallero a Curlo	1,2041	0,4867	0,2806	0,7673	
	Oglio a Temù	1,5908	0,5623	0,2550	0,8174	
	Chiese a Ponte Cimego	1,1562	1,2508	-0,1414	1,1094	
	Serio a Ponte Cene	1,0649	1,0431	-0,0156	1,0275	
	Oglio a Capo di Ponte	0,8623	0,4737	0,2505	0,7242	
A D I G E E B R E N T T	Aurino a Cadipietra	0,9934	0,3312	0,3471	0,6782	
	Aurino a Caminata	0,5361	0,4787	0,1457	0,6244	
	Avisio a Soraga	0,5375	0,3913	0,2906	0,6820	
	Gadera a Mantana	0,8745	0,4064	0,3150	0,7215	
	Rienza a Monguelfo	0,8465	0,5320	0,1998	0,7318	
	Rio Plan a Plan	0,9323	0,6683	0,0298	0,6981	
	Rio Ridanna a Vipiteno	0,8322	0,5355	0,1414	0,6769	
	Rio Sesto a Sesto	0,6331	0,2523	0,3137	0,5659	
	Brenta a Borgovalsugana	0,9587	0,3814	0,2682	0,6496	
	Astico a Pedesca	0,8713	0,4296	0,3109	0,7406	

A	Posina a Stancari	0,4876	0,1528	0,4614	0,6142
P I A V E	Boite a Cancia	0,8600	0,9362	0,0017	0,9379
	Boite a Podestagno	0,8100	0,7713	0,0034	0,7747
	Cordevole a La Vizza	1,0600	1,3995	-0,1829	1,2166
	Cordevole a Saviner	1,0000	1,1944	-0,0015	1,1929
	Fiorentina a Sottorovei	1,1500	1,2335	-0,0007	1,2327
	Padola a S. Stefano	0,8700	0,7493	0,1356	0,8849
	Piave a Ponte Lasta	0,7300	0,4043	0,3726	0,7769
	Sonna a Feltre	0,9900	0,5975	0,3494	0,9469

Tab.5.5 Parametri adimensionali della distribuzione di Weibull a tre parametri

Per poter confrontare la curva di durata adimensionale così ottenuta con la curva di durata specifica è necessario, per ogni valore di durata, moltiplicare la portata adimensionale per la pioggia media annua e dividere per 31,536.

Sviluppo del modello

In questo capitolo vengono riportate le relazioni di regressione individuate tra i parametri adimensionali della distribuzione di Weibull e le grandezze caratteristiche dei bacini al fine di costruire un unico modello “macroregionale” capace di stimare le curve di durata all’interno di tutte le zone considerate.

6.1 Regionalizzazione dei parametri

Una volta eseguita l’adimensionalizzazione dei dati bisogna passare al processo di regionalizzazione con lo scopo di realizzare un modello che possa essere applicato a bacini privi di misure dirette delle portate giornaliere. Per poter costruire un modello regionale per la stima delle curve di durata delle portate è necessario correlare i parametri λ , ε e β alle principali caratteristiche geomorfologiche e climatiche dei bacini (estensione, quota media, inclinazione media e piovosità media annua). Se si ottengono delle relazioni di regressione significative è allora possibile stimare con precisione i parametri della Weibull a partire dalle grandezze caratteristiche del particolare bacino.

Nelle tabelle 6.1 e 6.2 sono riportati i valori del coefficiente di correlazione R^2 osservato tra i valori di λ , ε , β e i valori delle principali caratteristiche geomorfologiche e climatiche dei bacini oggetto di studio. Viene riportato anche il coefficiente di correlazione ottenuto tra i parametri λ , ε , β e il coefficiente di deflusso φ , calcolato come rapporto tra il volume medio annuo di deflusso e il volume medio annuo affluito in termini di precipitazioni:

$$\varphi = \frac{VOLUME\ MEDIO\ ANNUO\ MISURATO}{P * A * 1000} \quad (6.1)$$

Correlazione lineare					
	A	i	P	Hmed	ϕ
λ	0,0387	0,1966	0,0032	0,7264	0,8215
ε	0,1159	0,0037	0,002	0,0059	0,001
$\lambda-\varepsilon$	$6*10^{-7}$	0,1689	0,0007	0,4985	0,6311
β	0,0982	0,0504	0,0655	0,5488	0,2703

Tab. 6.1 Valori del coefficiente di correlazione lineare R^2 tra i valori di λ , ε , β e quelli delle principali caratteristiche geomorfologiche e climatiche dei bacini osservati.

Correlazione di potenza					
	A	i	P	Hmed	ϕ
λ	0,1626	0,2359	0,0262	0,8241	0,9158
ε	-	-	-	-	-
$\lambda-\varepsilon$	0,0243	0,2251	0,0128	0,5733	0,6599
β	0,1021	0,1262	0,0308	0,5157	0,277

Tab. 6.2 Valori del coefficiente di correlazione di potenza R^2 tra i valori di λ , ε , β e quelli delle principali caratteristiche geomorfologiche e climatiche dei bacini osservati.

I grafici dettagliati relativi al calcolo delle correlazioni di cui sopra sono riportati nell'appendice A.

6.2 Analisi del parametro λ

Il parametro λ viene spesso definito parametro di scala della distribuzione di Weibull a tre parametri; tuttavia bisogna ricordare che il parametro di scala in realtà non è λ bensì la differenza $(\lambda - \epsilon)$.

Come già affermato nel capitolo 3 il parametro λ definisce le dimensioni dei valori assunti dalla variabile: all'aumentare di λ aumentano tutte le portate a parità di durata. Per questo motivo, come sottolineato in numerosi studi precedenti, si può riscontrare una notevole correlazione tra questo parametro e la media della curva di durata. Nel caso in esame viene confermata questa tendenza, infatti, come si può vedere dal seguente grafico, la correlazione tra il parametro λ (adimensionale) e la media della curva di durata (adimensionale) è molto forte.

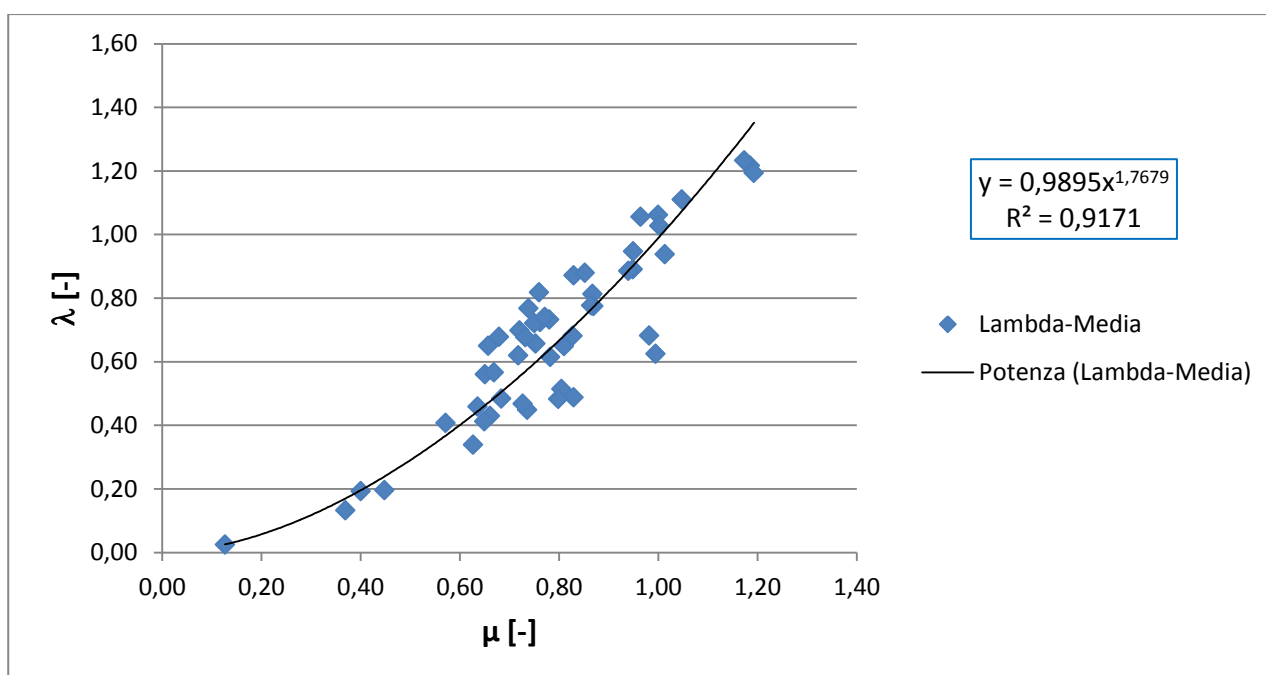


Fig. 6.1 Relazione di potenza tra λ e la media adimensionale della curva di durata μ

Analizzando i valori dei coefficienti di correlazione nelle tabelle 6.1 e 6.2 si può notare che esiste una correlazione particolarmente significativa tra λ e la quota media del bacino (quest'ultima è stata divisa per 1000 in modo tale da avere ordini di grandezza simili). In particolare considerando la correlazione di potenza si raggiunge un R^2 di 0,8241.

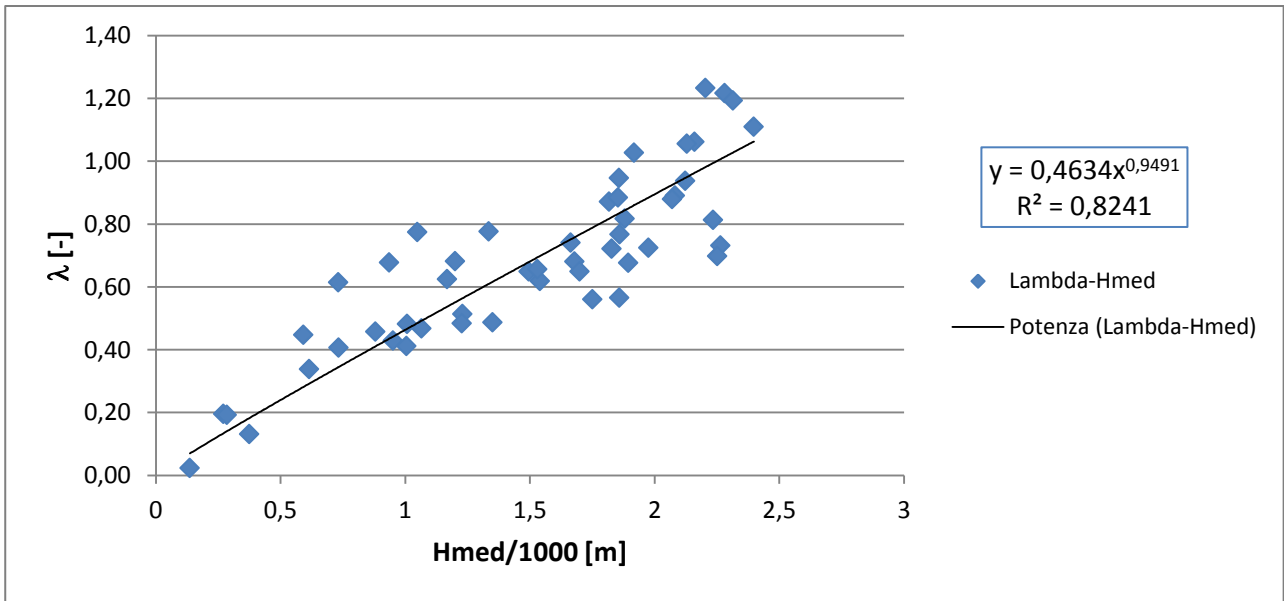


Fig. 6.2 Relazione di potenza tra λ e la quota media divisa per 1000

E' importante sottolineare che tale relazione di regressione è stata ottenuta considerando 50 bacini appartenenti a zone geo-morfo-climatiche chiaramente non omogenee tra loro. Questo risultato è pertanto particolarmente significativo allo scopo di questo lavoro, infatti, fornisce una prima semplice espressione per il calcolo delle curve di durata delle portate in fase progettuale o di programmazione.

Inoltre, come ci si aspettava, λ risulta fortemente correlato al coefficiente di deflusso ϕ . Considerando anche in questo caso la correlazione di potenza si ottiene il grafico seguente:

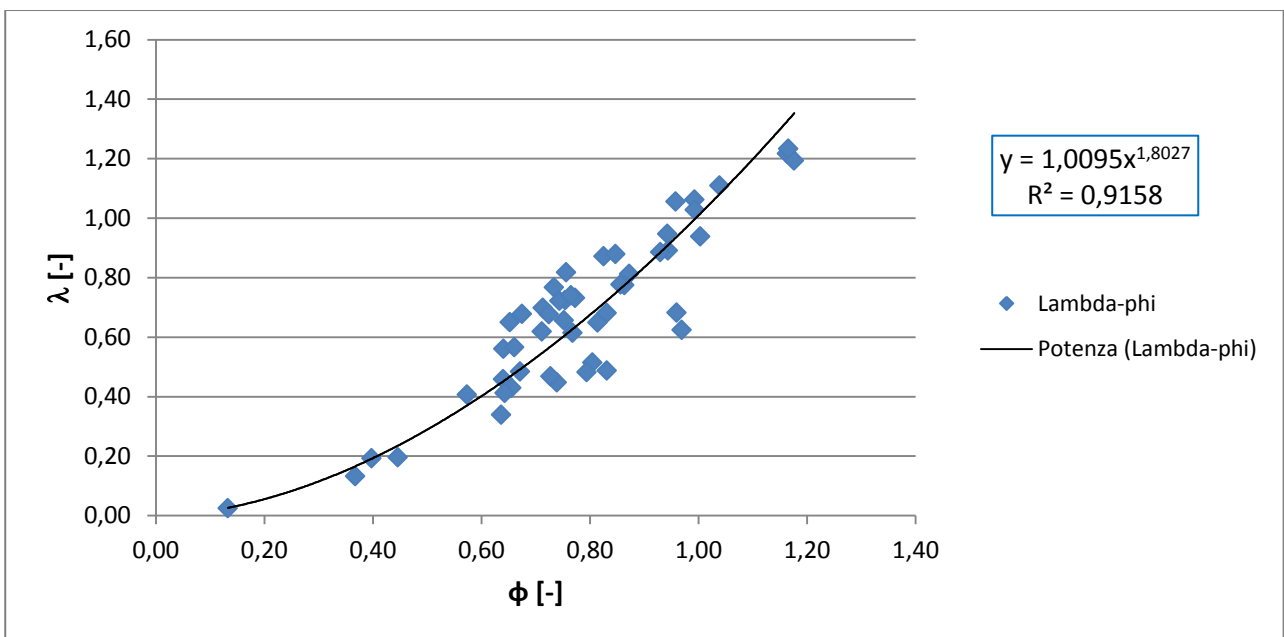


Fig. 6.3 Relazione di potenza tra λ e il coefficiente di deflusso ϕ

La netta correlazione esistente tra i due parametri è diretta conseguenza del fatto che λ risulta proporzionale alla media della curva di durata.

Le correlazioni tra λ e le altre grandezze caratteristiche del bacino non risultano invece significative.

6.3 Analisi del parametro ε

Il parametro di spostamento ε è pari alla portata minima osservabile nell'arco di un anno e si associa quindi a una durata di 365 giorni. Tale parametro, nonostante la precedente adimensionalizzazione, non si può considerare correlabile a nessuna delle principali grandezze caratteristiche dei bacini. Inoltre non è possibile ricavare correlazioni di potenza in quanto esistono dei valori negativi di ε . Questi ultimi non hanno tra l'altro alcun significato fisico in quanto corrisponderebbero a dei valori negativi di portata.

Si è deciso quindi di analizzare il parametro di scala (λ - ε). Tale parametro gode di una discreta correlazione con la quota media, soprattutto nel caso in cui si consideri la correlazione di potenza.

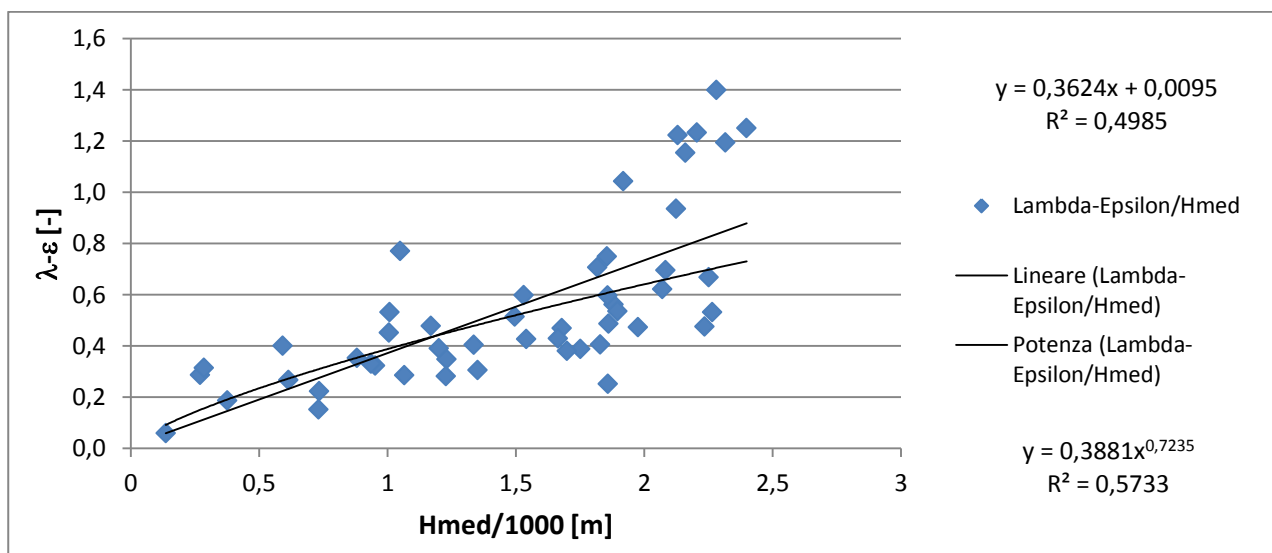


Fig. 6.4 Relazioni tra λ - ε e la quota media divisa per 1000

Il parametro (λ - ε) risulta discretamente correlato anche rispetto al coefficiente di deflusso. Si nota in questo caso una forte concentrazione dei campioni nella parte centrale del grafico.

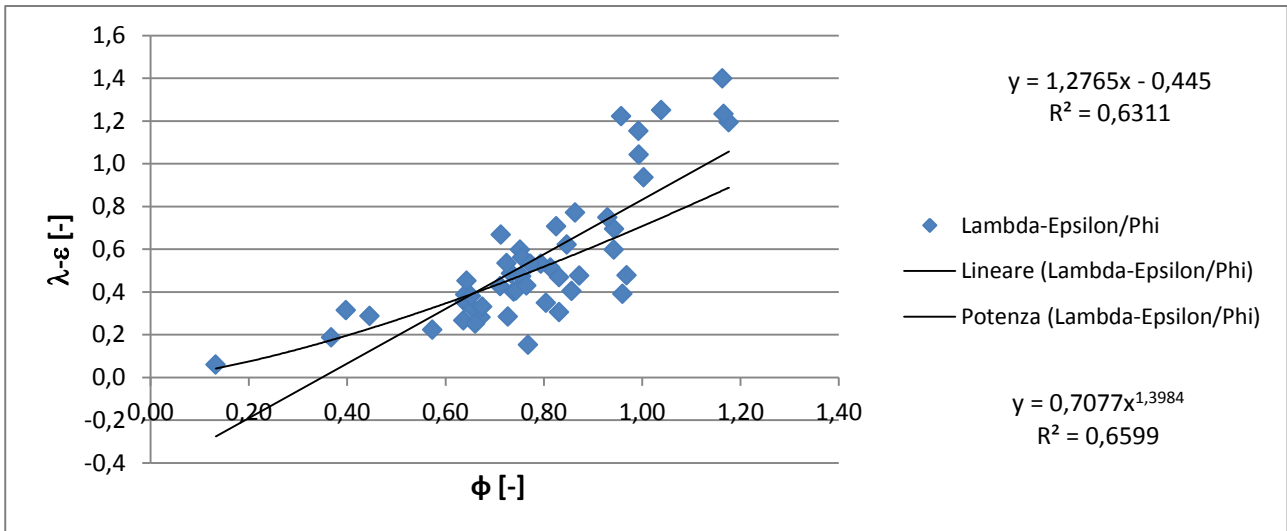


Fig. 6.5 Relazioni tra $\lambda-\epsilon$ e il coefficiente di deflusso ϕ

Anche per il parametro $\lambda-\epsilon$ non si evidenziano correlazioni degne di nota con le altre grandezze caratteristiche.

6.4 Analisi del parametro β

Per quanto riguarda il parametro di forma si può notare una discreta correlazione soltanto con la quota media del bacino, come sottolineato anche da tutti i precedenti studi:

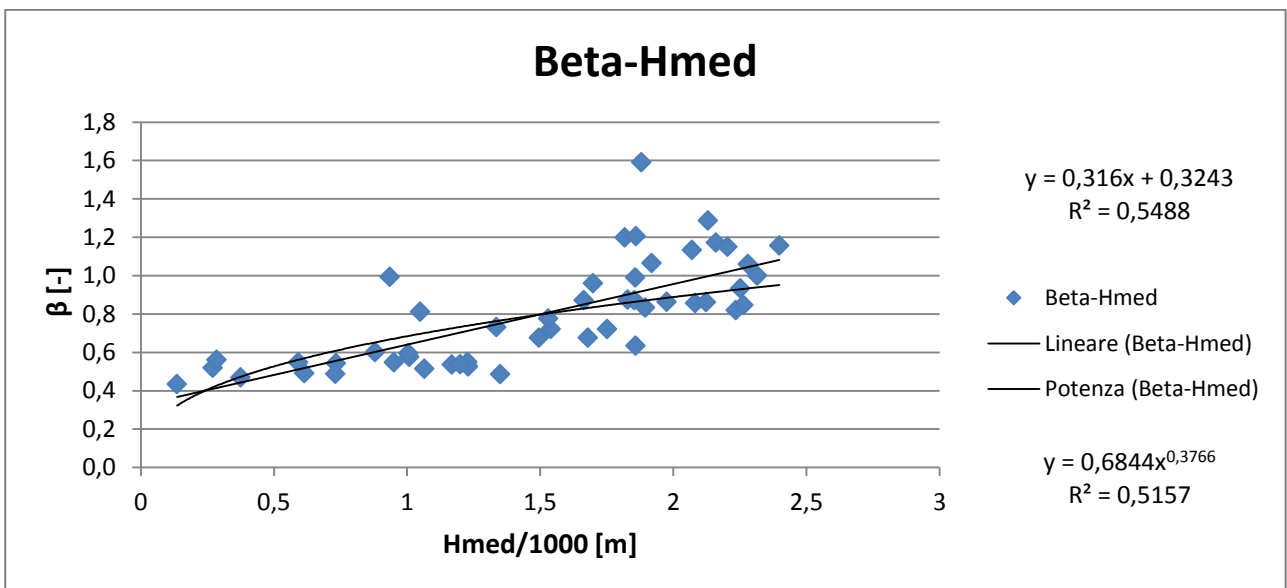


Fig. 6.6 Relazioni tra β e la quota media del bacino divisa per 1000

6.5 Autocorrelazione tra λ e gli altri parametri

Le relazioni di regressione individuate per i parametri (λ - ε) e β non risultano particolarmente significative e non permettono quindi di sviluppare un unico modello regionale che porti a dei risultati soddisfacenti. Per questo motivo si è pensato di confrontare questi due parametri con il parametro λ che gode invece di una correlazione buona rispetto alla quota media e ottima rispetto al coefficiente di deflusso.

I risultati sono i seguenti:

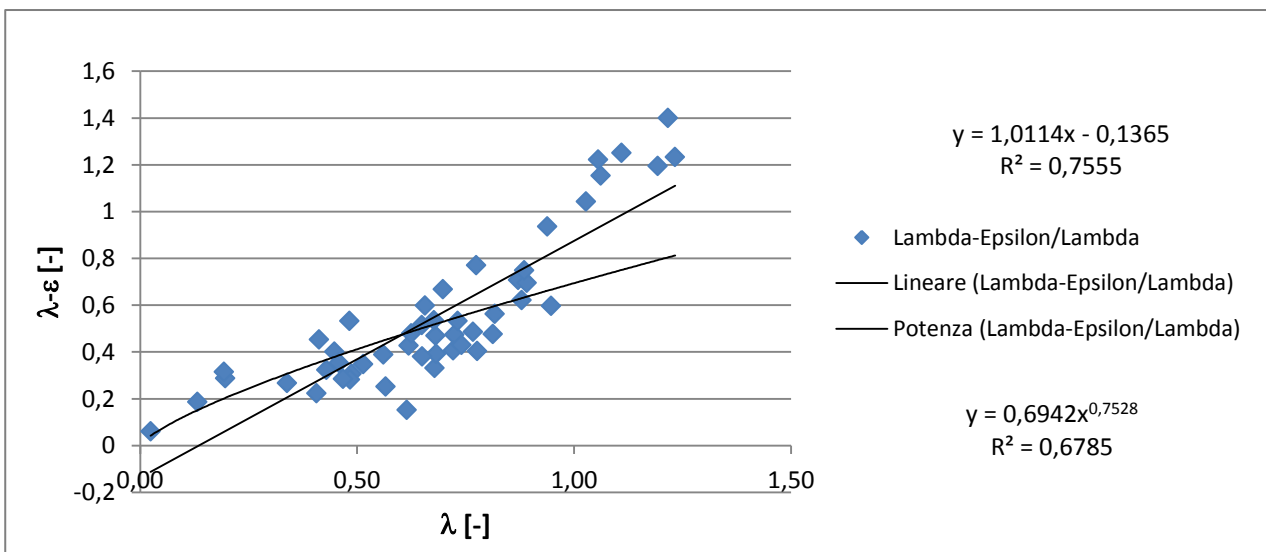


Fig. 6.7 Relazioni tra λ - ε e λ

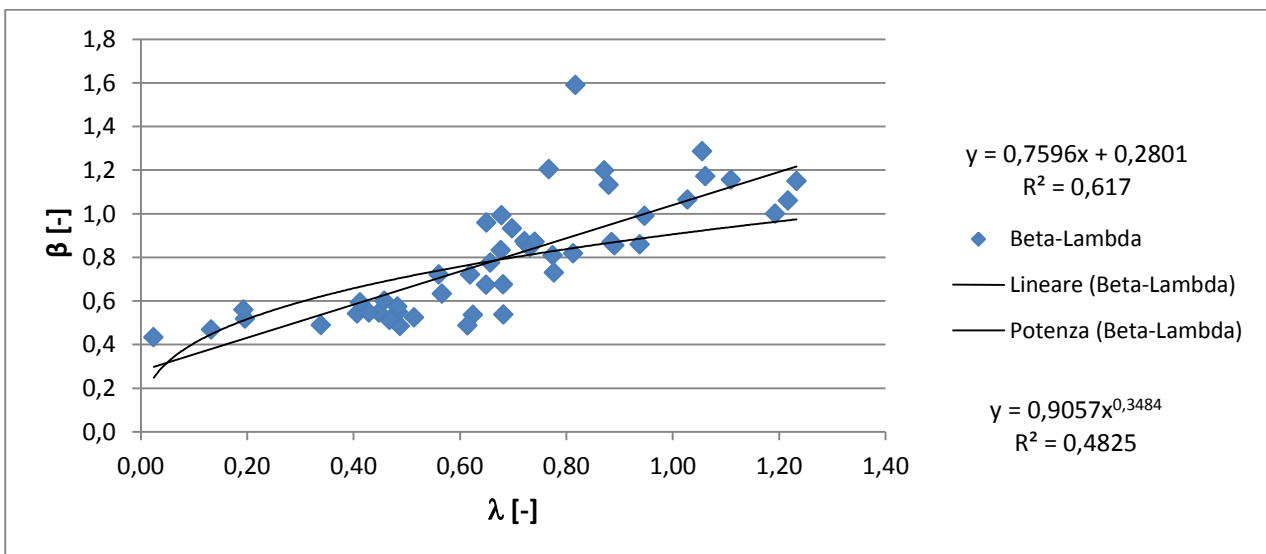


Fig. 6.8 Relazioni tra β e λ

Come si può vedere dai grafici precedenti la correlazione tra il parametro λ e gli altri due è evidente anche se non particolarmente significativa in entrambi i casi. Tenendo conto della buona correlazione esistente tra $(\lambda-\varepsilon)$ e φ si è pensato di correlare $(\lambda-\varepsilon)$ al prodotto $(\lambda*\varphi)$.

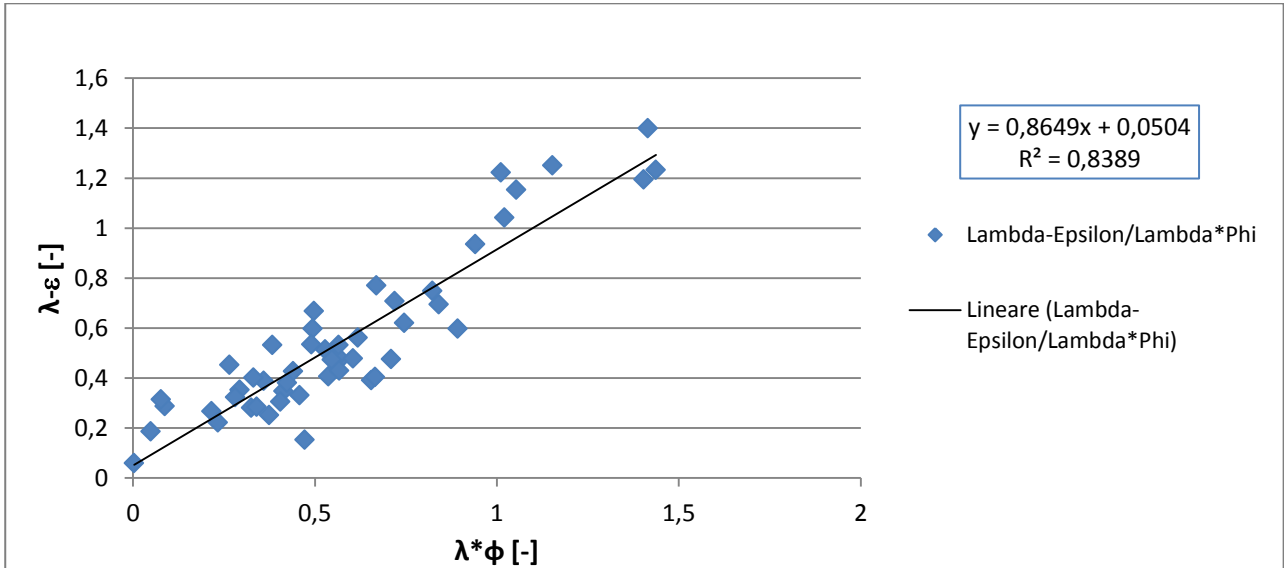


Fig. 6.9 Relazione lineare tra $\lambda-\varepsilon$ e $\lambda*\varphi$

In questo modo si può ricavare una netta relazione lineare tra le due quantità.

Lo stesso discorso non vale per il parametro β , infatti, come si può vedere dal grafico, né la correlazione lineare né quella di potenza portano a dei risultati soddisfacenti.

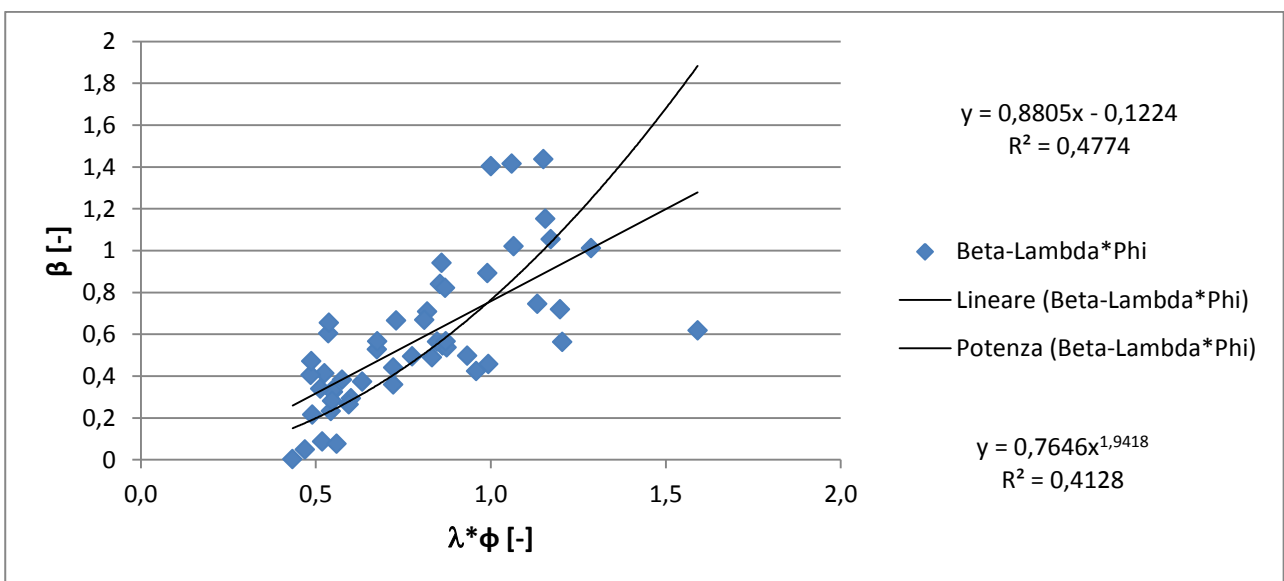


Fig. 6.10 Relazioni tra β e $\lambda*\varphi$

Si è deciso a questo punto di provare a verificare se esistesse una correlazione tra il parametro β e il rapporto tra λ e ϕ .

In questo caso il risultato è stato sorprendente: esiste un'ottima correlazione tra le due quantità anche se non di tipo lineare o di potenza.

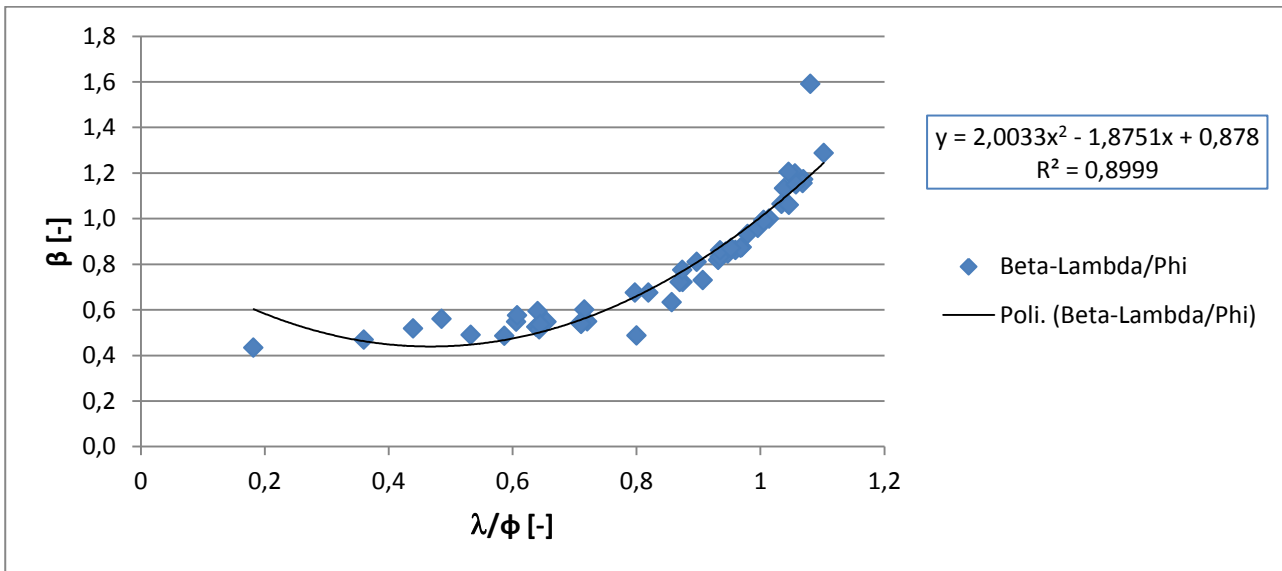


Fig. 6.11 Relazione polinomiale quadratica tra β e λ/ϕ

Una relazione polinomiale di secondo grado porta a un coefficiente di correlazione di ben 0,9. Se si ricorre poi ad una relazione polinomiale di terzo grado allora la curva interpreta i dati in maniera ottimale:

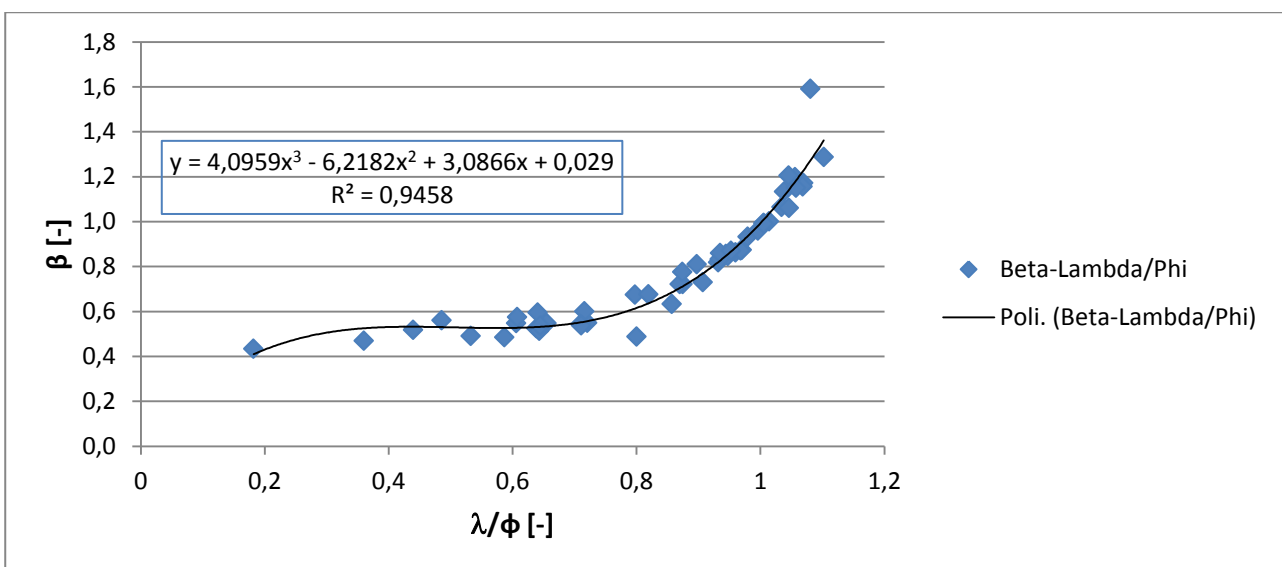


Fig. 6.12 Relazione polinomiale cubica tra β e λ/ϕ

6.6 Costruzione del modello

Le relazioni di regressione trovate per $(\lambda - \varepsilon)$ e β sono ora molto buone e possono essere applicate per costituire un modello per la stima della curva di durata delle portate.

Si ricorda che la stima delle portate alle diverse durate viene effettuata attraverso l'applicazione della distribuzione di Weibull a tre parametri

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln \left(\frac{\theta}{365} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \tag{6.2}$$

mentre il modello occorre per stimare i parametri di tale distribuzione.

Per il caso oggetto di studio il modello si basa sulla fondamentale correlazione presente tra λ e h_{med} .

Per prima cosa si deve quindi stimare λ attraverso la relazione di potenza

$$\lambda = 0,4634 * \left(\frac{H_{med}}{1000} \right)^{0,9491} \tag{6.3}$$

Successivamente occorre stimare il valore del coefficiente di deflusso (non noto per bacini non monitorati) invertendo la relazione di potenza presente all'interno del grafico seguente:

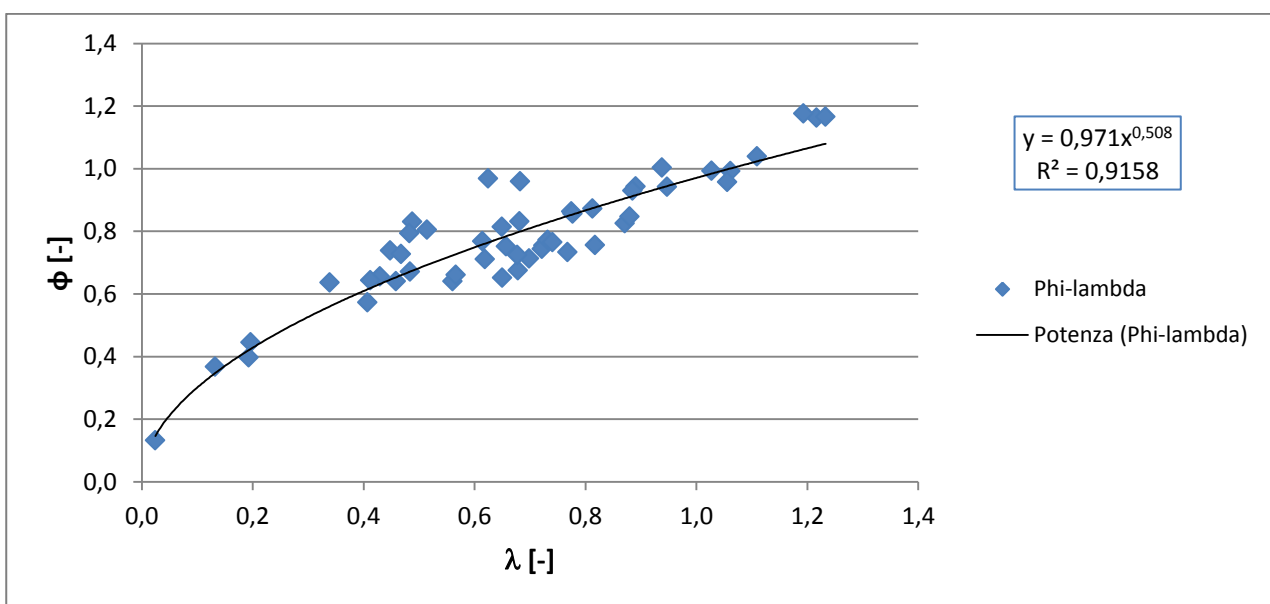


Fig. 6.13 Relazione di potenza tra il coefficiente di deflusso ϕ e il parametro λ

La stima di φ si effettua quindi attraverso la formula:

$$\varphi = 0,971 * \lambda^{0,508} \quad (6.4)$$

A questo punto è possibile stimare $(\lambda - \varepsilon)$ attraverso la relazione:

$$(\lambda - \varepsilon) = 0,8649 * (\lambda * \varphi) + 0,0504 \quad (6.5)$$

Il parametro β si può stimare attraverso la relazione quadratica:

$$\beta = 2,0033 * \left(\frac{\lambda}{\varphi}\right)^2 - 1,8751 * \left(\frac{\lambda}{\varphi}\right) + 0,878 \quad (6.6)$$

Oppure attraverso la relazione cubica:

$$\beta = 4,0959 * \left(\frac{\lambda}{\varphi}\right)^3 - 6,2182 * \left(\frac{\lambda}{\varphi}\right)^2 + 3,0866 * \left(\frac{\lambda}{\varphi}\right) + 0,029 \quad (6.7)$$

(6.1)

In definitiva si propongono due modelli per la stima della curva di durata delle portate: il primo (MODELLO 1) utilizza la relazione polinomiale quadratica per la stima di β , mentre il secondo (MODELLO 2) utilizza la relazione polinomiale cubica.

MODELLO 1

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln\left(\frac{\theta}{365}\right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (6.8)$$

$$\lambda = 0,4634 * \left(\frac{Hmed}{1000}\right)^{0,9491} \quad (6.9)$$

$$\varphi = 0,971 * \lambda^{0,508} \quad (6.10)$$

$$(\lambda - \varepsilon) = 0,8649 * (\lambda * \varphi) + 0,0504 \quad (6.11)$$

$$\beta = 2,0033 * \left(\frac{\lambda}{\varphi}\right)^2 - 1,8751 * \left(\frac{\lambda}{\varphi}\right) + 0,878 \quad (6.12)$$

MODELLO 2

$$q = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \left[-\ln\left(\frac{\theta}{365}\right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (6.13)$$

$$\lambda = 0,4634 * \left(\frac{Hmed}{1000}\right)^{0,9491} \quad (6.14)$$

$$\varphi = 0,971 * \lambda^{0,508} \quad (6.15)$$

$$(\lambda - \varepsilon) = 0,8649 * (\lambda * \varphi) + 0,0504 \quad (6.16)$$

$$\beta = 4,0959 * \left(\frac{\lambda}{\varphi}\right)^3 - 6,2182 * \left(\frac{\lambda}{\varphi}\right)^2 + 3,0866 * \left(\frac{\lambda}{\varphi}\right) + 0,029 \quad (6.17)$$

Le portate che si ricavano applicando questi modelli sono adimensionali.

Per ritornare alle portate specifiche in [l/(s*km²)] e poterle confrontare con quelle osservate occorre moltiplicare ogni valore di portata per la pioggia media annua del bacino e dividere per 31,536.

Le caratteristiche dei bacini necessarie per l'applicazione di questi modelli sono pertanto le seguenti:

- quota media [m], necessaria per il calcolo di λ e di conseguenza di $(\lambda - \varepsilon)$ e β ;
- piovosità media annua [mm/anno], indispensabile per passare da portate adimensionali a portate specifiche
- estensione del bacino [km²], che, come si vedrà in seguito, è necessaria per il calcolo dei volumi effettivi defluiti in [m³/s].

Bisogna notare che per la stima di $(\lambda-\varepsilon)$ e β si è fatto ricorso ad un'autocorrelazione tra i parametri, pertanto la precisione nella stima di λ va a condizionare fortemente la bontà della stima degli altri due parametri.

Per quanto riguarda il parametro β si è ritenuto opportuno tralasciare, sulla base dei risultati conseguiti negli elaborati precedenti, la sua suddivisione in due valori diversi per le brevi e le lunghe durate.

Applicazione dei modelli e risultati

All'interno di questo capitolo si riportano i risultati ottenuti applicando i due modelli precedentemente sviluppati.

7.1 Stima delle curve di durata medie

I modelli descritti sono stati applicati per la stima delle curve di durata medie delle portate dei 50 bacini monitorati inizialmente considerati.

Per ogni bacino sono stati stimati i parametri adimensionali λ , $(\lambda-\varepsilon)$ e β e successivamente si sono calcolate le portate adimensionali corrispondenti a ciascuna durata. Le portate così ottenute sono poi state trasformate in portate specifiche secondo il metodo descritto in precedenza in modo tale da poterle confrontare con le curve di durata medie osservate e con le curve di durata medie calcolate mediante la formula di Weibull tradizionale in cui la stima dei parametri avviene a partire dai momenti della distribuzione, ovvero media, deviazione standard e coefficiente di asimmetria.

Il risultato è stato un adattamento generale soddisfacente tra le curve di durata stimate con il modello e le curve di durata osservate.

Nel dettaglio vi sono casi in cui i modelli interpretano in maniera ottimale il fenomeno fisico come si può osservare dal grafico in fig. 7.1. In altri casi vi è un certo scostamento dalle curve osservate che tuttavia può considerarsi accettabile (esempio fig. 7.2). Sono stati infine registrati rari casi in cui questo scostamento è significativo, soprattutto per quanto riguarda la parte iniziale della curva riferita alle brevi durate.

Si è inoltre riscontrata, nella maggioranza dei casi, una sostanziale sovrapposizione tra le curve descritte dai dal modello 1 e dal modello 2. Ciò significa che i risultati conseguibili attraverso i due modelli variano di poco.

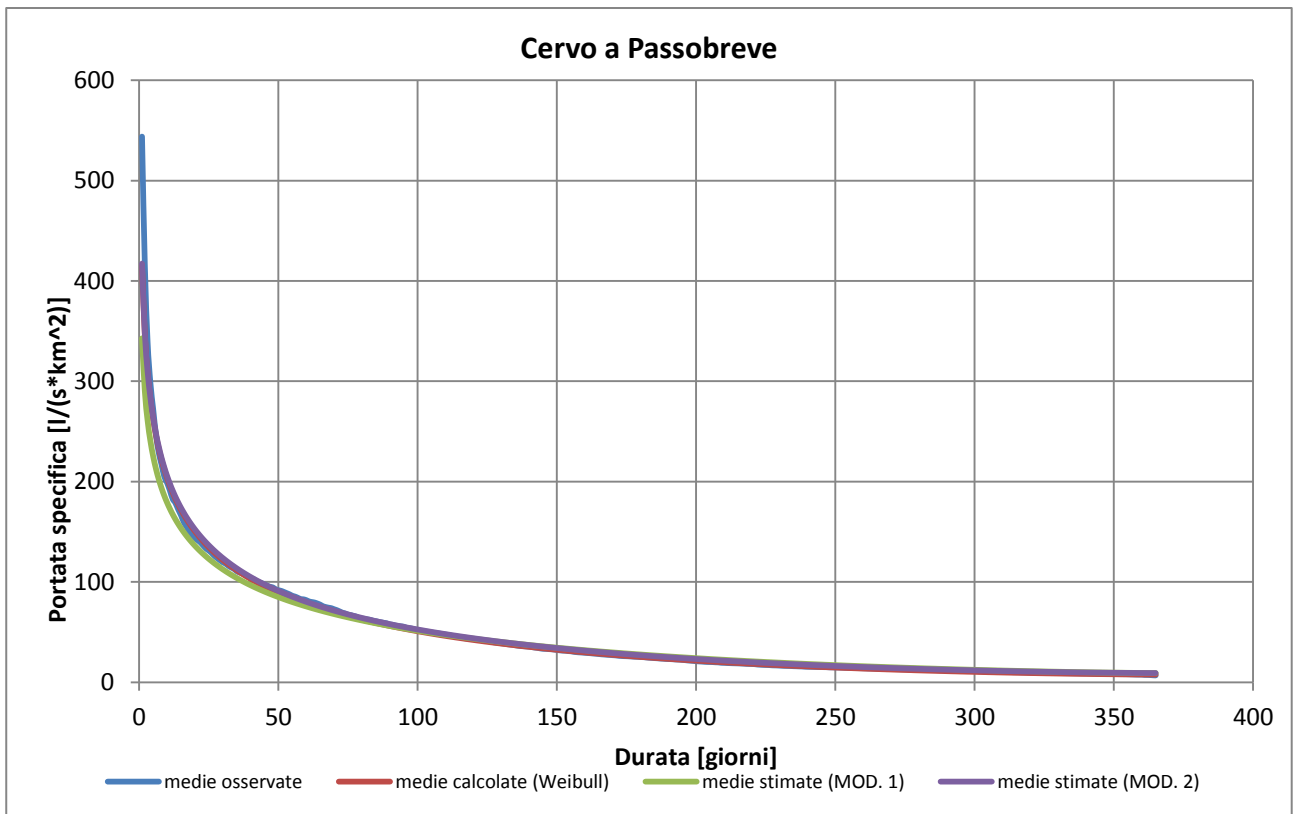


Fig. 7.1 Curva di durata media osservata, calcolata (Weibull) e stimata (MOD. 1 e MOD. 2) del Cervo a Passobreve

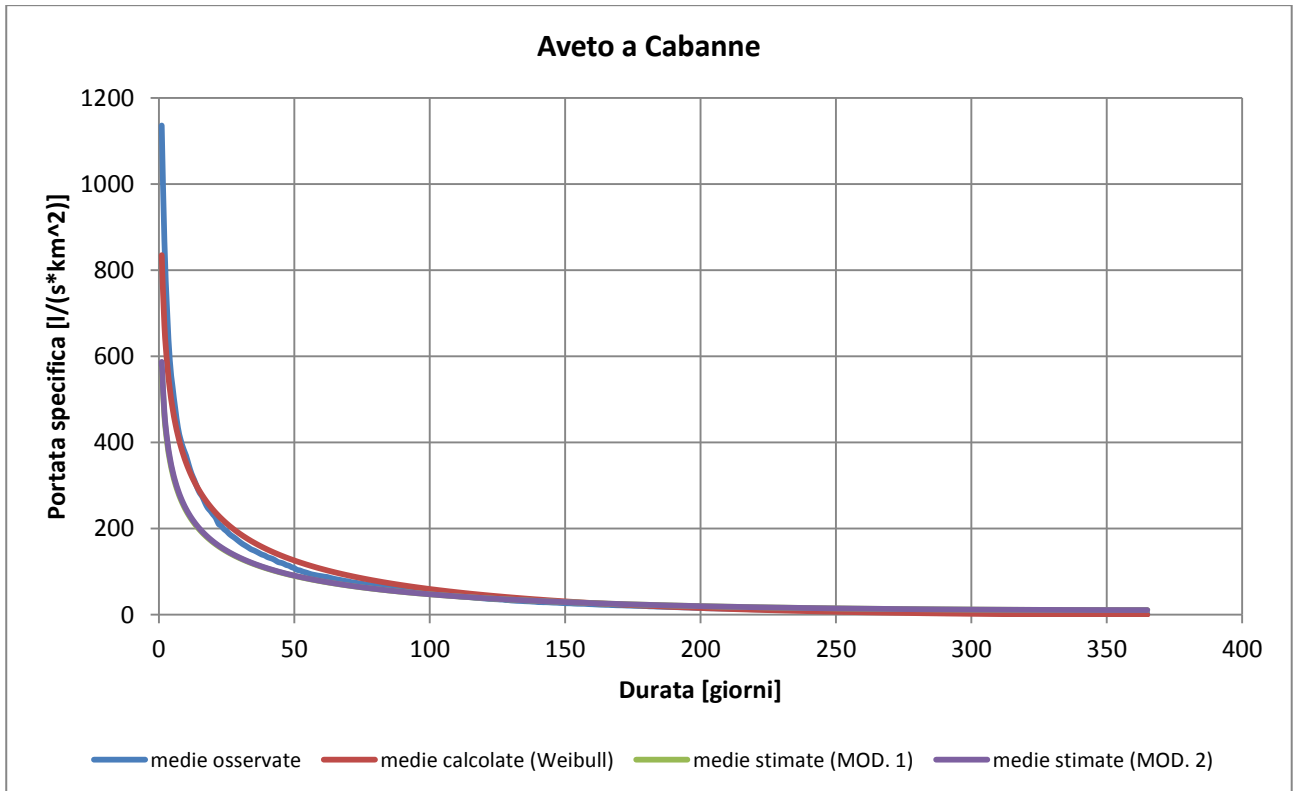


Fig. 7.2 Curva di durata media osservata, calcolata (Weibull) e stimata (MOD. 1 e MOD. 2) dell'Aveto a Cabanne

I grafici di confronto tra le curve di durata medie osservate, calcolate con la Weibull tradizionale e stimate col modello 1 sono riportati nell'appendice B. Si è preferito non riportare per ogni bacino anche le curve stimate col modello 2 poiché nella maggioranza dei casi non si riuscirebbe ad apprezzare uno scostamento rispetto alle curve descritte dal modello 1.

I valori che si discostano maggiormente nella stima della curva di durata si riscontrano per i bacini dello Scodogna e del Quaderna. In questi due casi risulta evidente anche lo scostamento tra le due curve stimate per le brevi durate; in entrambi i casi il modello 1 si avvicina maggiormente alla curva di durata osservata. E' importante notare che questi due bacini sono poco estesi ($A < 25 \text{ km}^2$) e soprattutto presentano un forte carattere torrentizio (si registrano portate medie giornaliere praticamente nulle per almeno la metà dell'anno).

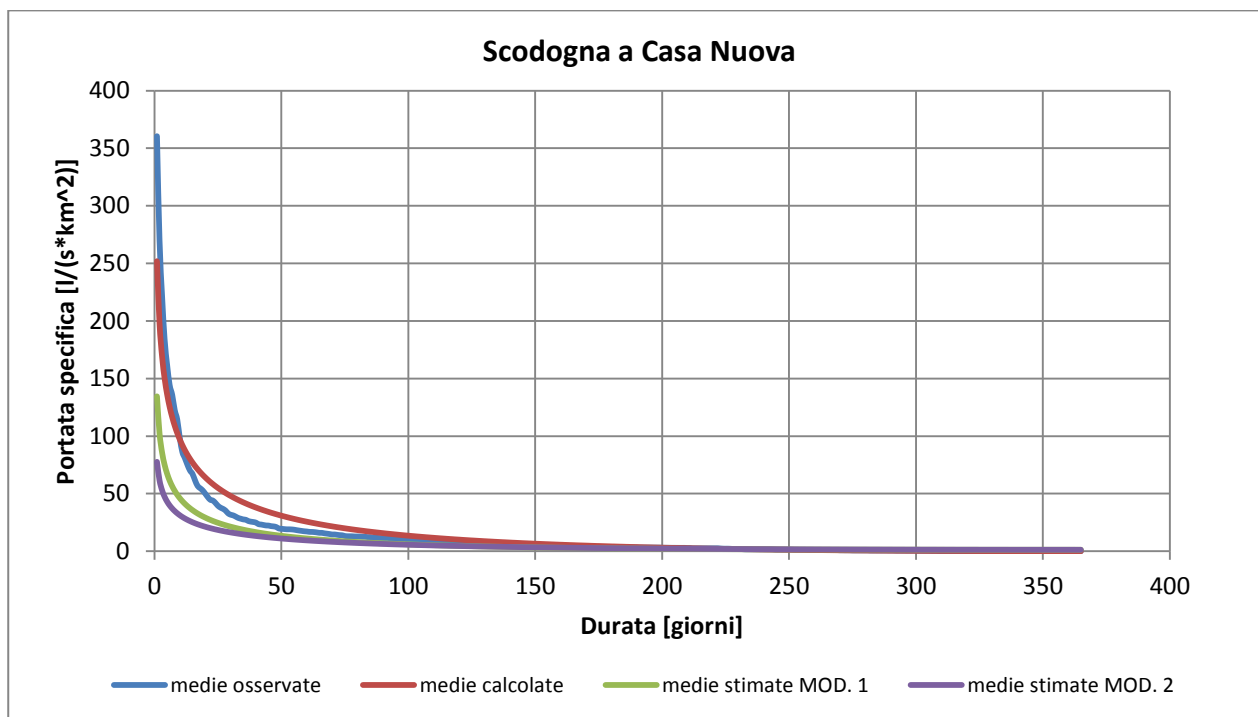


Fig. 7.3 Curva di durata media osservata, calcolata (Weibull) e stimata (MOD. 1 e MOD. 2) dello Scodogna a Casa Nuova

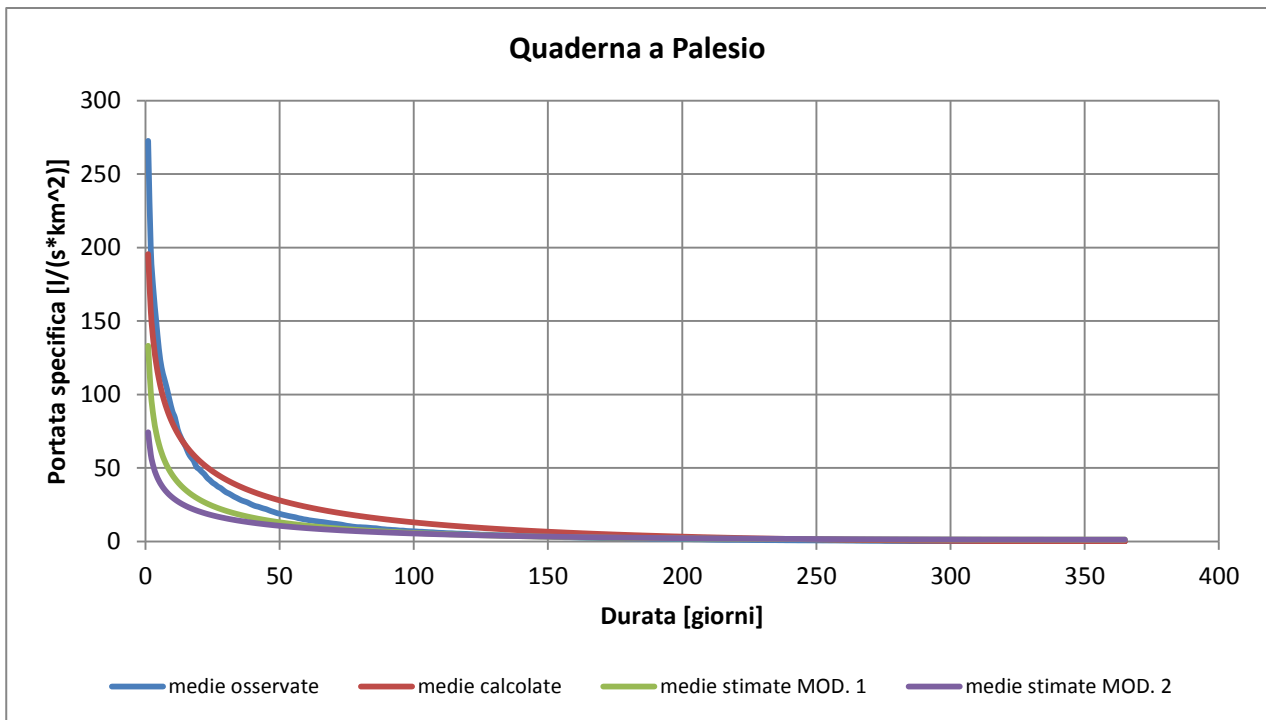


Fig. 7.4 Curva di durata media osservata, calcolata (Weibull) e stimata (MOD. 1 e MOD. 2) del Quaderna a Palesio

7.2 Analisi dei volumi idrici

Per valutare quale dei due modelli sia più adatto a rappresentare le curve di durata sono stati calcolati i volumi medi annuali di deflusso per ogni stazione analizzata. Bisogna ricordare che i volumi totali defluiti corrispondono all'area sottesa dalla curva di durata. Pertanto integrando le curve di durata medie osservate si sono ottenuti i volumi totali medi osservati, mentre integrando le curve di durata medie stimate si sono ottenuti i volumi totali medi stimati.

L'integrazione delle curve è stata eseguita attraverso il metodo dei trapezi utilizzando come passo di integrazione una durata pari a un giorno.

Nelle figure seguenti sono riportate le relazioni tra i volumi totali medi osservati e stimati attraverso i due modelli.

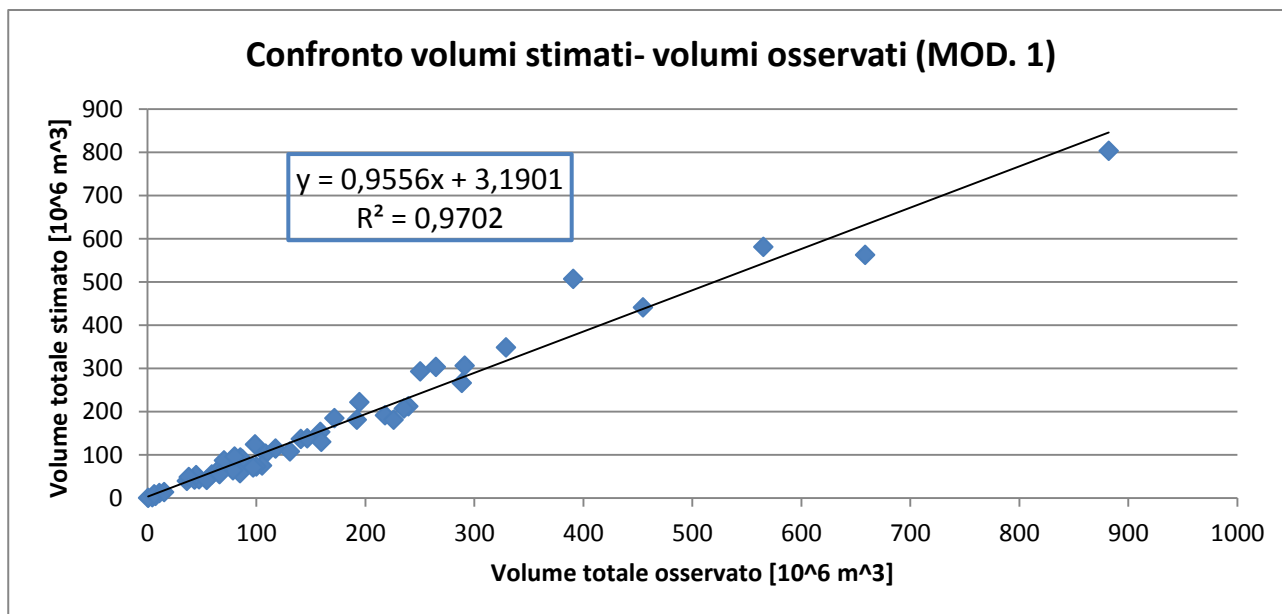


Fig. 7.5 Relazione lineare tra i volumi totali annui stimati e osservati – MOD. 1

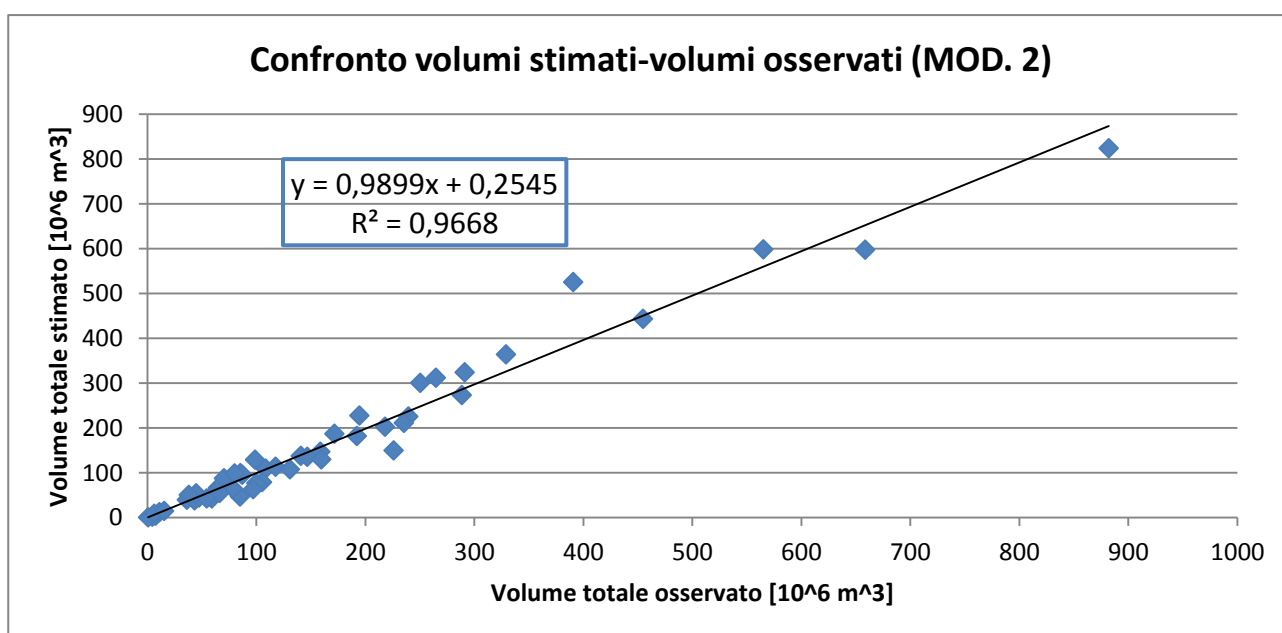


Fig. 7.6 Relazione lineare tra i volumi totali annui stimati e osservati – MOD. 2

Dal valore dei coefficienti di correlazione si deduce che entrambi i modelli interpretano in modo molto buono il fenomeno reale e lo scostamento tra volumi stimati e osservati è in generale di modesta entità. Tra i due modelli risulta leggermente migliore il primo.

Successivamente è stato calcolato l'errore relativo tra volume totale stimato e volume totale osservato secondo la relazione:

$$errore = \left| \frac{V_{oss}^{tot} - V_{stim}^{tot}}{V_{oss}^{tot}} \right| * 100 \tag{7.1}$$

Nelle figure seguenti si possono osservare gli errori relativi calcolati per ogni bacino preso in considerazione. Si riportano cinque istogrammi, ognuno dei quali si riferisce alla corrispondente zona.

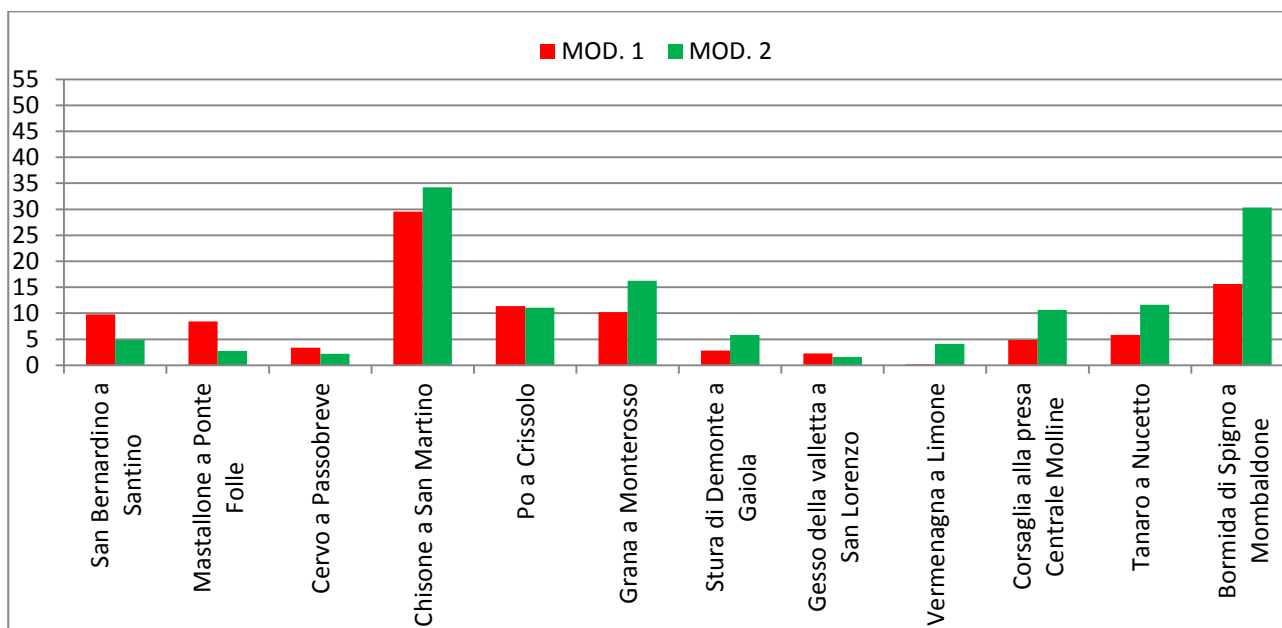


Fig. 7.7 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Alpi Occidentali

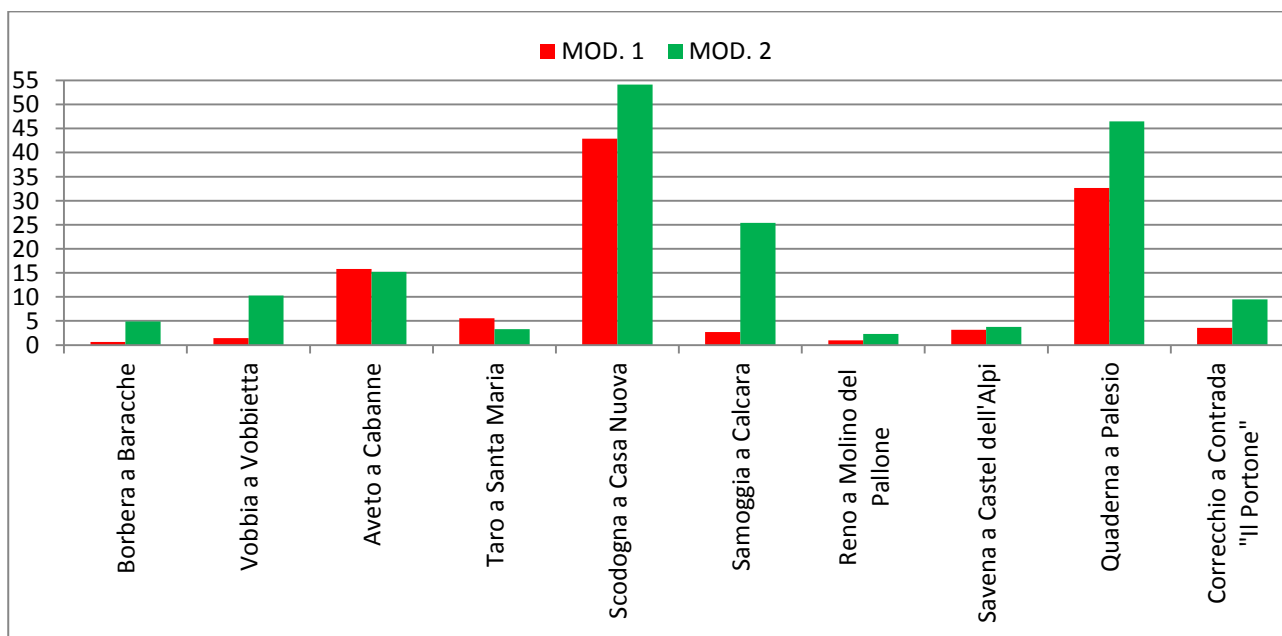


Fig. 7.8 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Appennini

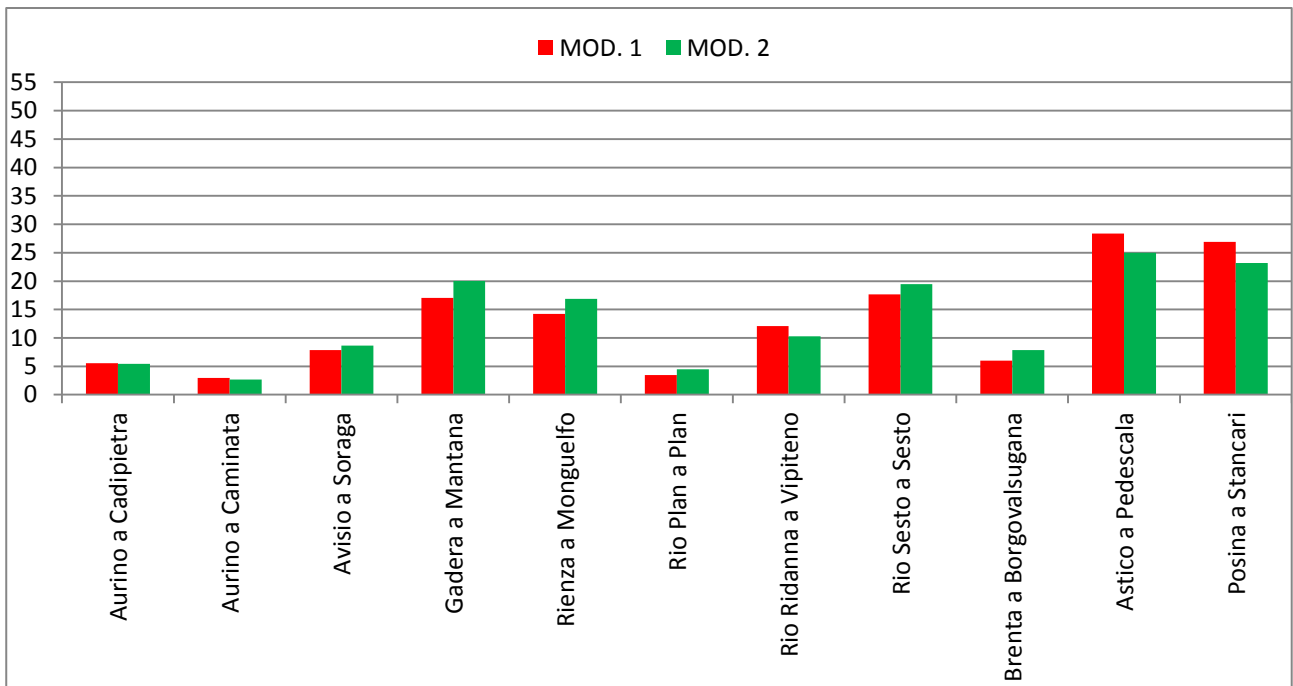


Fig. 7.9 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Adige e Brenta

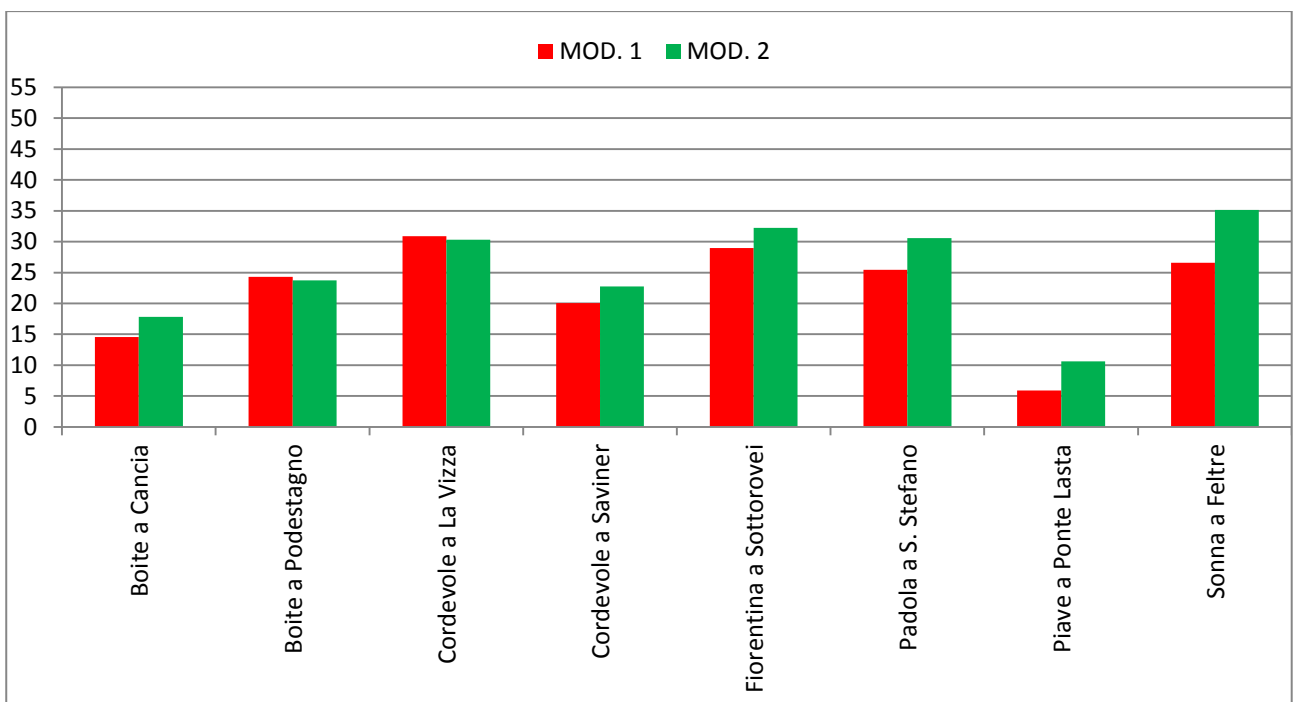


Fig. 7.10 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Piave

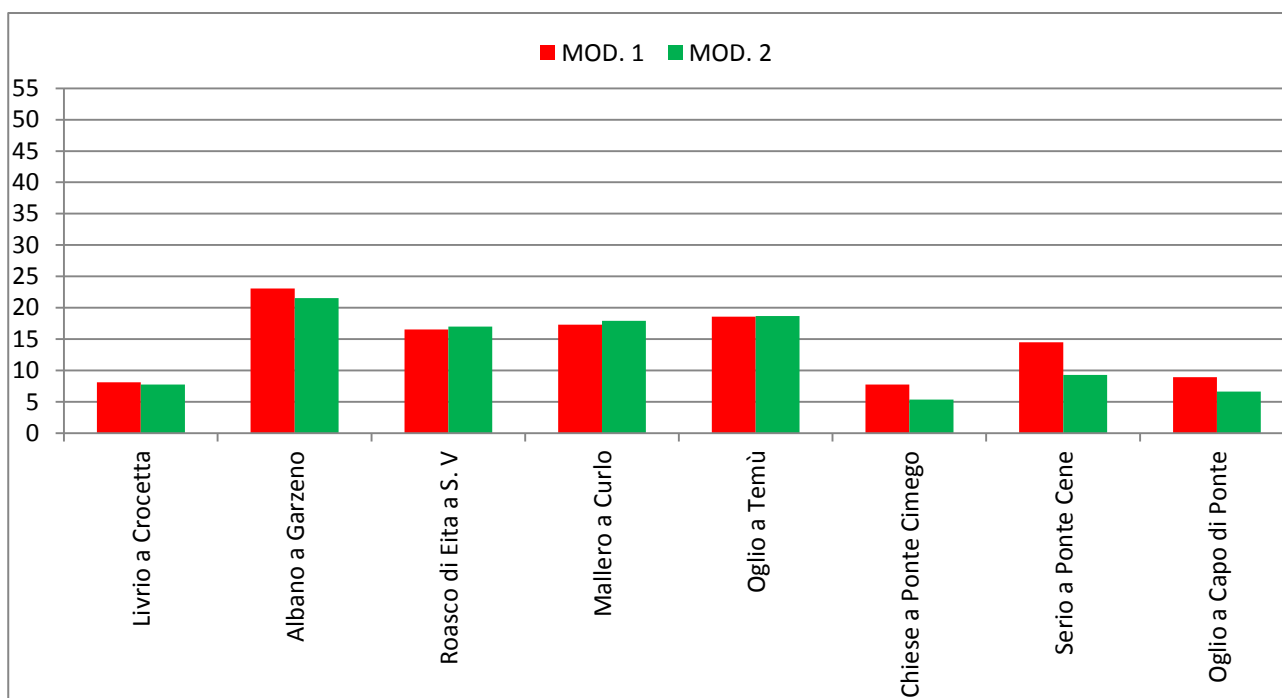


Fig. 7.11 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Lombardia

Nella tabella seguente si riportano gli errori relativi medi riferiti alla singola zona e all'intera serie dei bacini considerati.

ZONA	ERRORE MEDIO PERCENTUALE	
	MOD. 1	MOD. 2
Alpi Occidentali	8,7	11,29
Appennino	12,71	19,87
Adige e Brenta	12,92	13,08
Piave	22,09	25,4
Lombardia	14,34	13,01
Tutti i bacini	13,55	16,11

Tab. 7.1 Errori medi percentuali per i due modelli

Il modello 1 si rivela più preciso nella stima dei volumi annui medi di deflusso per tutte le zone considerate tranne che per la Lombardia. Se si considera tutta la serie di bacini si ottiene un errore medio del 13,55% per il modello 1 e del 16,11% per il modello 2. Si può poi osservare che gli errori maggiori in assoluto si ottengono applicando il modello 2 ai bacini appenninici del Quaderna e dello Scodogna.

Considerando la migliore relazione di regressione utilizzata nel modello 2 per la stima del parametro β , potrebbe sembrare incongruente che a quest'ultimo modello siano associati gli errori

maggiori. Tuttavia bisogna considerare il fatto che le relazioni di stima di $(\lambda-\varepsilon)$ e β dipendono dalla precedente stima di λ e di φ . Infatti se la stima di λ si rivela corretta allora anche le stime degli altri parametri saranno molto buone. Se al contrario si parte con una stima di λ che presenta un errore non trascurabile allora tale errore si amplificherà nella stima degli altri parametri, a maggior ragione in presenza di un termine elevato al cubo.

Si può affermare quindi che tra i due modelli, nella maggior parte dei casi, il primo riesce a stimare in modo più attendibile la curva di durata delle portate.

Analizzando nel dettaglio le singole zone si può dire che le stime complessivamente migliori si ottengono per le Alpi Occidentali: errori generalmente inferiori al 10% esclusi i bacini della Bormida di Spigno a Mombaldone e del Chisone a San Martino. Anche per i bacini appenninici in generale vengono fornite stime precise tranne che in quei casi isolati di bacini fortemente torrentizi, di cui si è già discusso, dove l'errore non è trascurabile. La zona dell'Adige e del Brenta presenta margini di errore variabili ma nel complesso piuttosto contenuti (errore sempre inferiore al 30% per entrambi i modelli). La zona in cui gli errori di stima sono maggiori è quella del Piave: nella maggior parte dei casi l'errore supera il 20% per entrambi i modelli. La Lombardia infine è caratterizzata da errori mai trascurabili (sempre superiori al 5%), ma allo stesso tempo mai troppo rilevanti (sempre inferiori al 25%).

Alla pagina seguente si riporta l'istogramma globale riferito a tutte le stazioni.

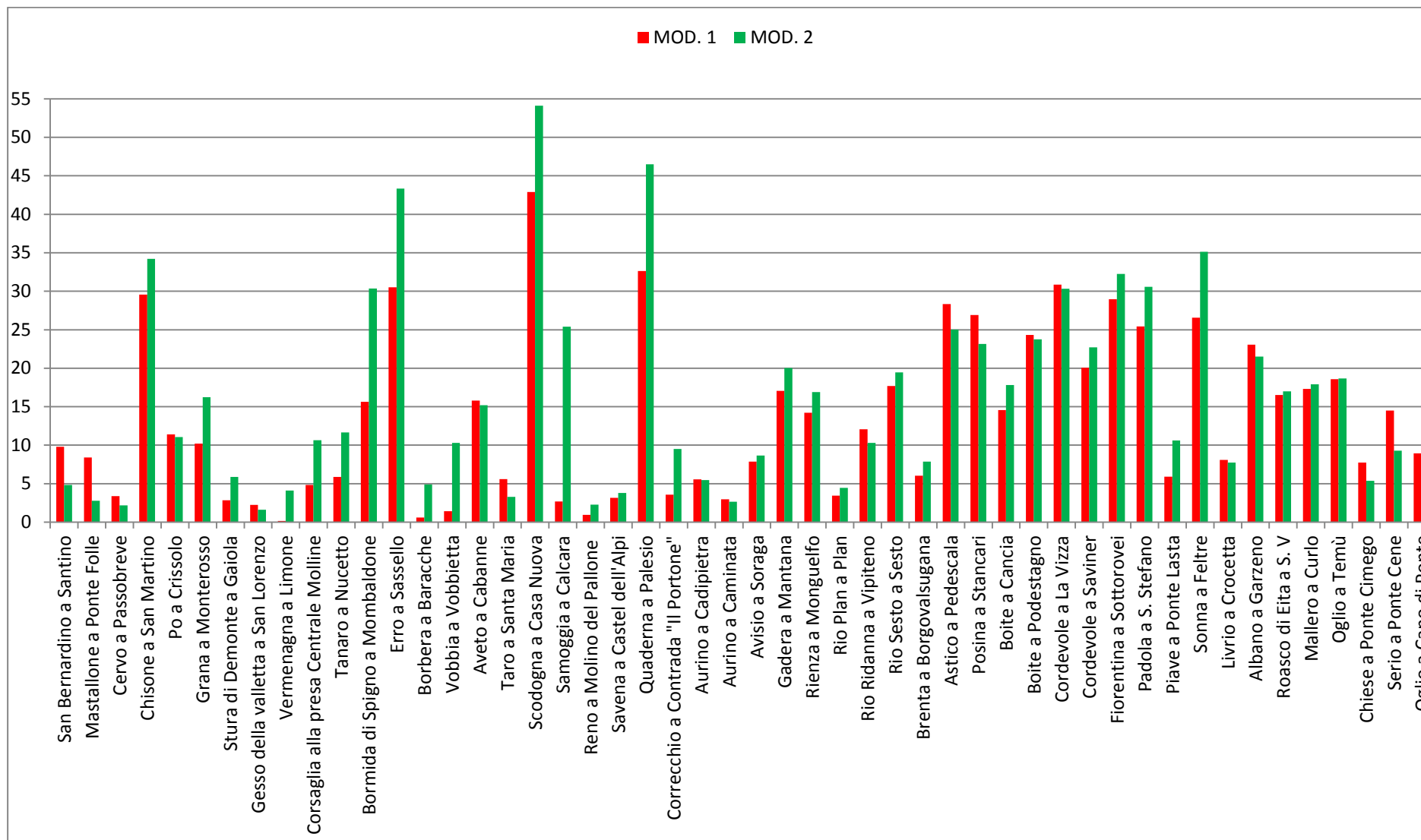


Fig. 7.12 Errori relativi nella stima del volume totale annuo di deflusso – Istogramma globale

7.3 Calcolo dei volumi utili

Uno degli scopi principali per cui viene costruita la curva di durata di un corso d'acqua è quello di valutare la sua predisposizione alla realizzazione di opere di captazione idroelettrica. A questo proposito è importante ricordare che gli impianti idroelettrici ad acqua fluente vengono progettati in funzione di una portata di progetto che corrisponde alla massima portata che l'impianto è in grado di turbinare. La portata di progetto deve essere valutata in modo oculato. Infatti, per una portata di progetto sovradimensionata, l'impianto funzionerà a pieno regime per brevissimi periodi: questa soluzione comporta dei costi di realizzazione delle opere eccessivi a fronte di un utilizzo parziale dell'impianto per la maggior parte dell'anno. Viceversa un sottodimensionamento della portata di progetto comporta costi di realizzazione decisamente ridotti ma anche il mancato sfruttamento di una porzione non indifferente della risorsa idrica potenzialmente sfruttabile. Solitamente, per ottenere un buon compromesso, le portate di progetto vengono scelte all'interno di un range di durate corrispondenti compreso tra i 30 e i 90 giorni.

Quindi per il dimensionamento di questo tipo di impianti occorre conoscere non tanto il volume medio annuo di deflusso, bensì il volume medio annuo utile. Per volume utile si intende il volume idrico totale che l'impianto è in grado di turbinare per un assegnato valore di portata di progetto.

Scegliendo ad esempio una portata di progetto a cui corrisponde una durata di 30 giorni, è possibile calcolare il volume medio annuo utile come somma di due volumi: il volume che si ottiene integrando la curva di durata media delle portate con il metodo dei trapezi tra le durate di 31 e 365 giorni più il volume derivante dal prodotto della portata media di progetto per la durata corrispondente (30 giorni). In fase progettuale poi bisognerà infine sottrarre al volume medio utile disponibile il volume derivante dal rilascio del minimo deflusso vitale.

Si è proceduto quindi al calcolo del volume medio utile per tutti i bacini considerati considerando come portata di progetto quella corrispondente alla durata di 30 giorni.

Di seguito si riportano i grafici di confronto tra i volumi utili stimati e osservati.

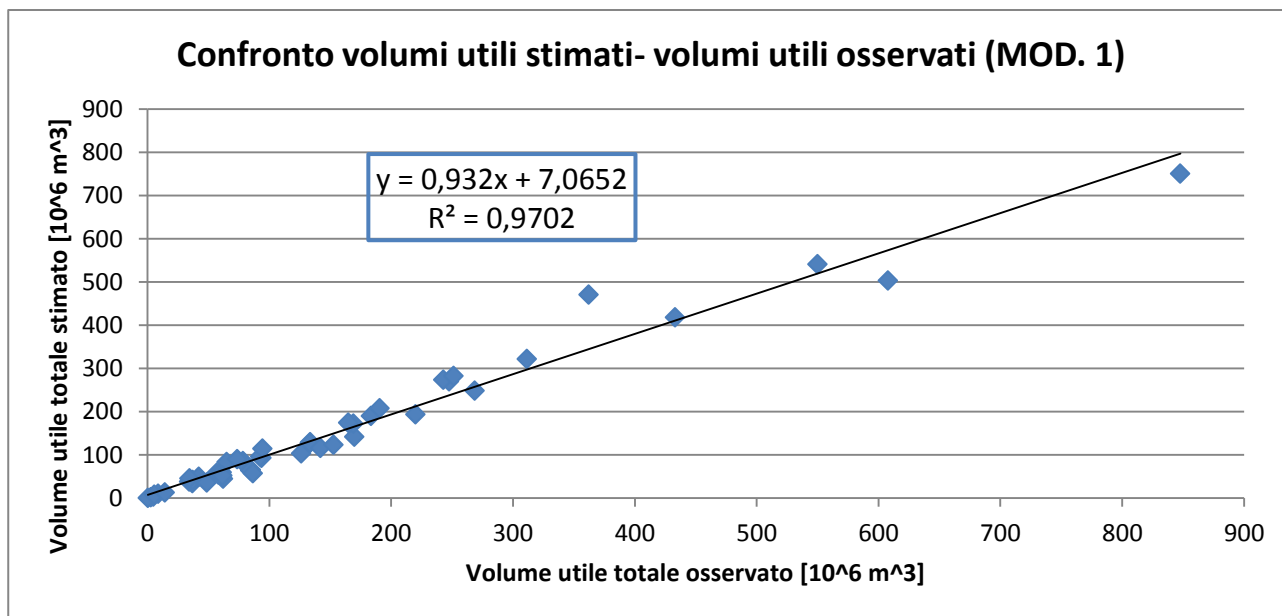


Fig. 7.13 Confronto volumi utili stimati – volumi utili osservati (MOD. 1)

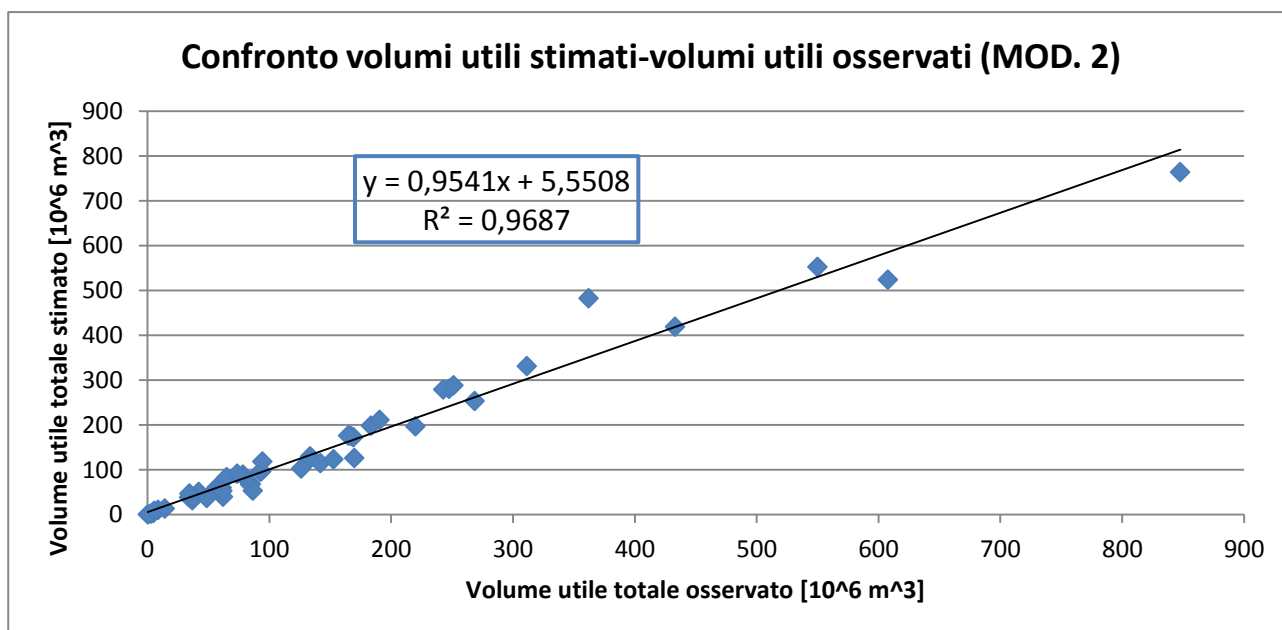


Fig. 7.14 Confronto volumi utili stimati – volumi utili osservati (MOD. 2)

Dai valori dei coefficienti di correlazione lineare si deduce che i due modelli conducono a una stima particolarmente precisa dei volumi utili. Anche in questo caso il primo modello risulta leggermente migliore del secondo.

Andando a calcolare gli errori relativi secondo riferiti al volume medio utile annuale si ottengono i seguenti risultati:

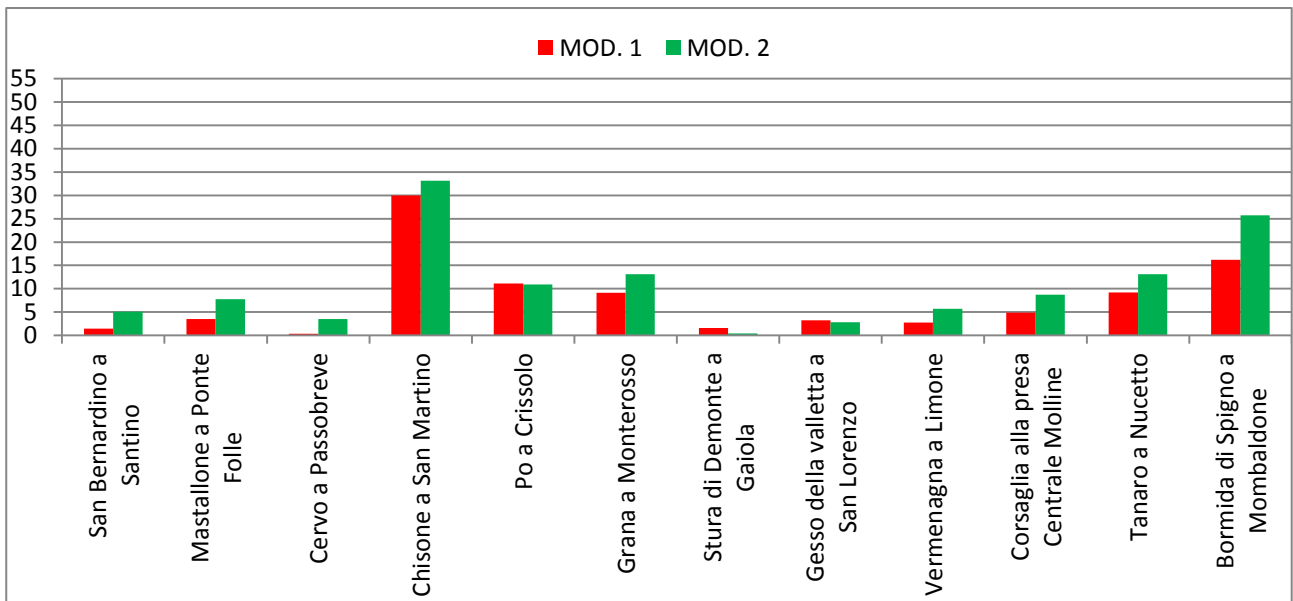


Fig. 7.15 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Alpi Occidentali

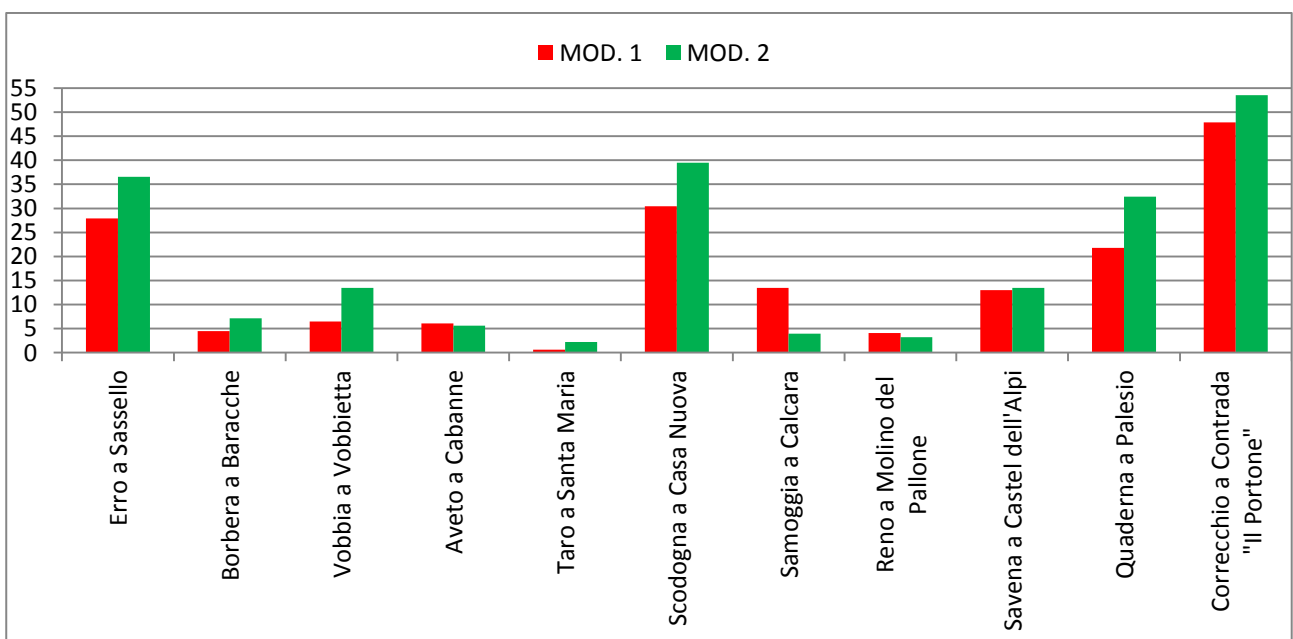


Fig. 7.16 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Appennini

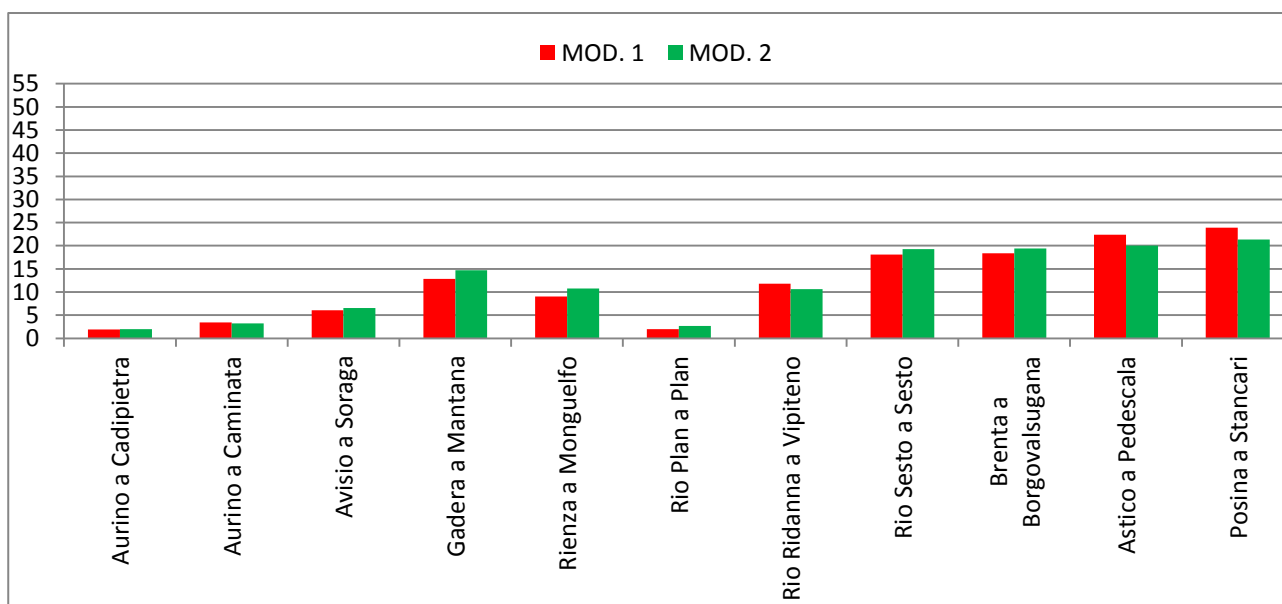


Fig. 7.17 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Adige e Brenta

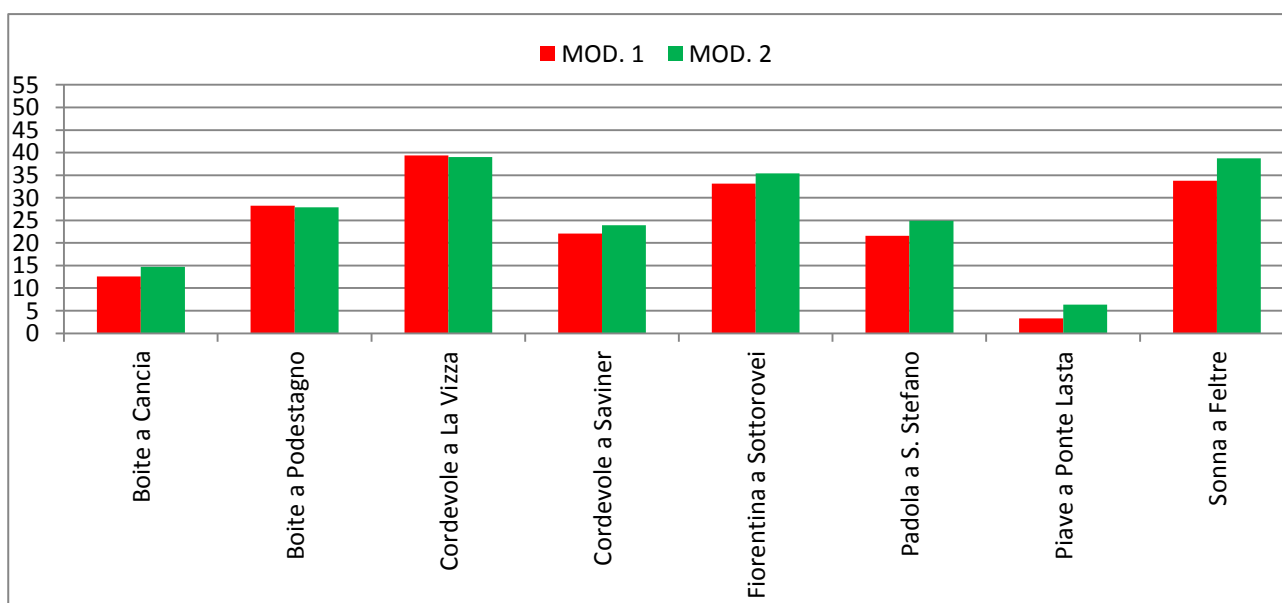


Fig. 7.18 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Piave

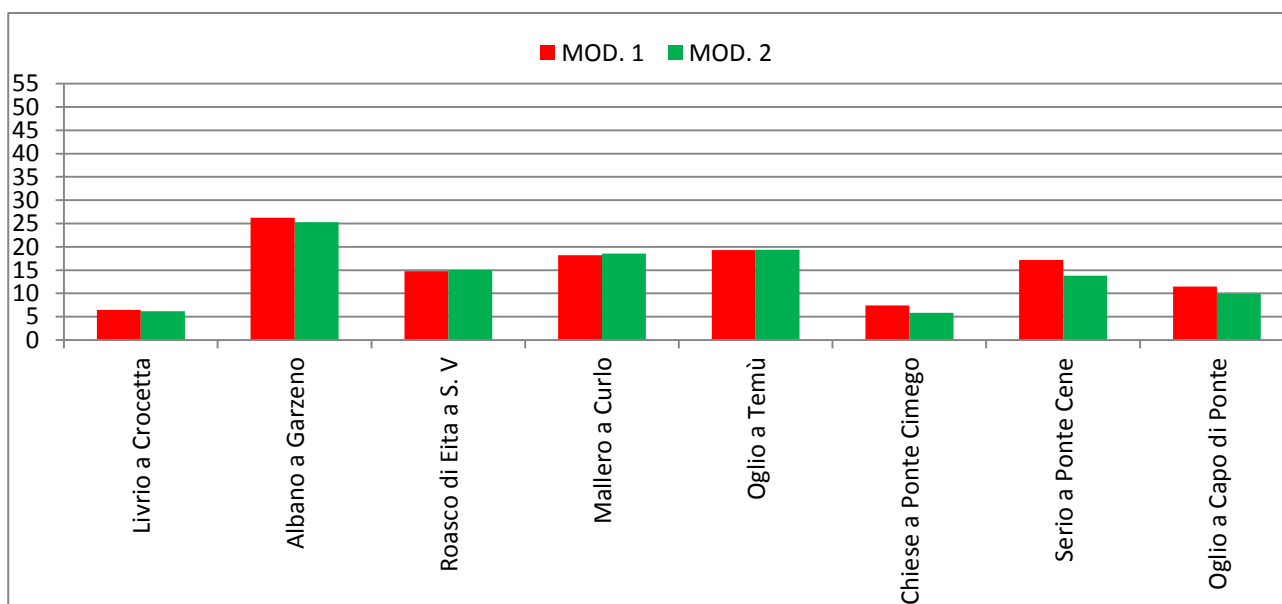


Fig. 7.19 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Lombardia

Gli errori relativi medi nella stima del volume utile annuo e del volume totale annuo di deflusso sono i seguenti:

ZONA	VOLUMI UTILI	
	MOD. 1	MOD. 2
Alpi Occidentali	7,77	10,83
Appennino	12,84	15,77
Adige e Brenta	11,80	11,87
Piave	24,26	26,37
Lombardia	15,12	14,25
Tutti i bacini	13,6	15,17

ZONA	VOLUMI TOTALI	
	MOD. 1	MOD. 2
Alpi Occidentali	8,7	11,29
Appennino	12,71	19,87
Adige e Brenta	12,92	13,08
Piave	22,09	25,4
Lombardia	14,34	13,01
Tutti i bacini	13,55	16,11

Tab.7.2 Errori relativi medi riferiti alle singole zone e all’intera serie di bacini (MOD. 1 e MOD. 2)

Confrontando questi risultati con quelli relativi ai volumi totali si può notare che l’errore medio complessivo per il primo modello si mantiene praticamente inalterato. Vi è invece un miglioramento complessivo di quasi un punto percentuale nell’applicazione del secondo modello.

Le differenze tra gli errori medi relativi alle singole zone in questo caso si acuiscono. Infatti si può notare un miglioramento per le Alpi Occidentali e viceversa un peggioramento per quanto riguarda i bacini del Piave. All’interno delle altre tre zone i risultati medi si mantengono buoni in quanto non superano in generale il 15%. Anche in questo caso il MOD. 1 si rivela migliore all’interno di tutte le zone ad eccezione della Lombardia.

Nel calcolo degli errori medi in questo caso si è preferito escludere il bacino appenninico del Correcchio a Contrada “Il Portone” in quanto ad esso è associato un errore rilevante che dipende dal

fatto che il bacino, oltre ad avere un'estensione di soli 6 km², presenta delle portate particolarmente elevate concentrate in pochissimi giorni all'interno dell'anno e per il resto è caratterizzato da scarsissimi valori di portata.

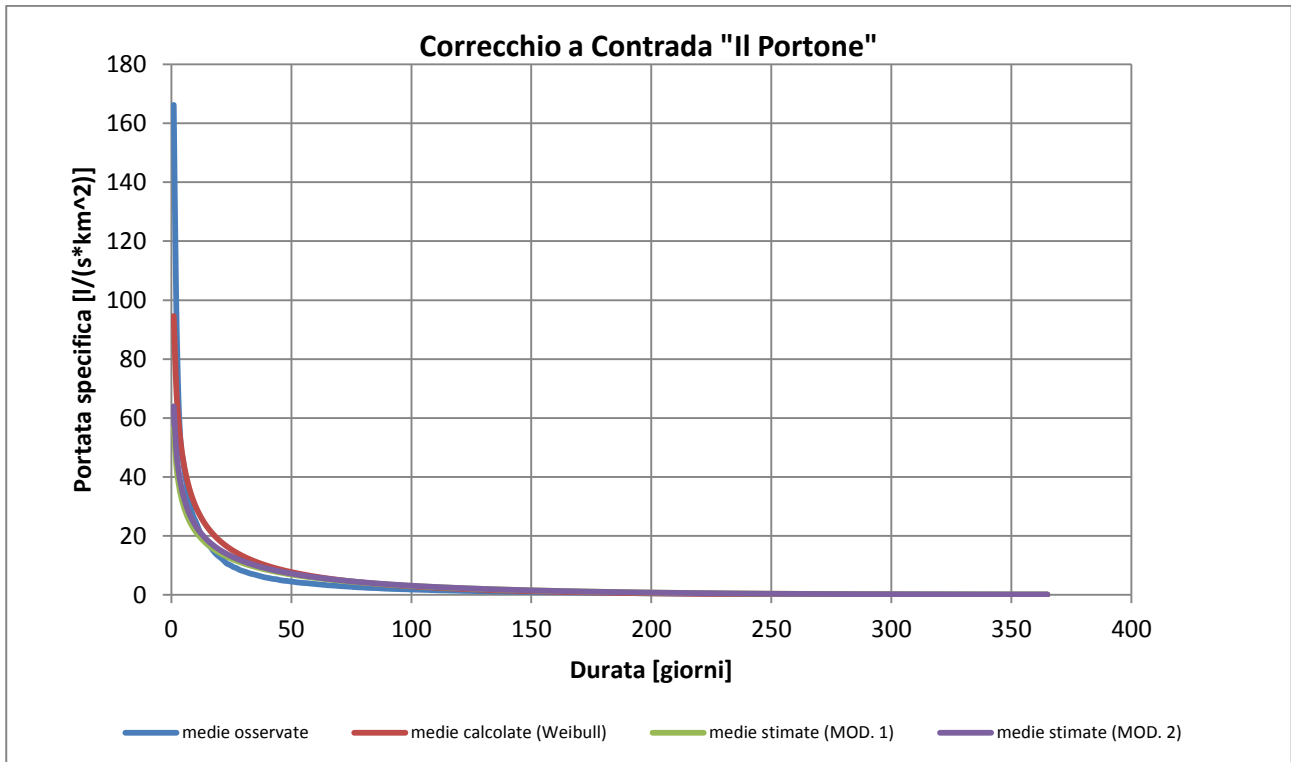


Fig. 7.20 Curve di durata osservate, calcolate e stimate del torrente Correcchio a Contrada “Il Portone”

Alla pagina seguente è riportato l'istogramma globale nel quale si possono osservare gli errori relativi tra volumi utili stimati e osservati per l'intera serie dei bacini considerati.

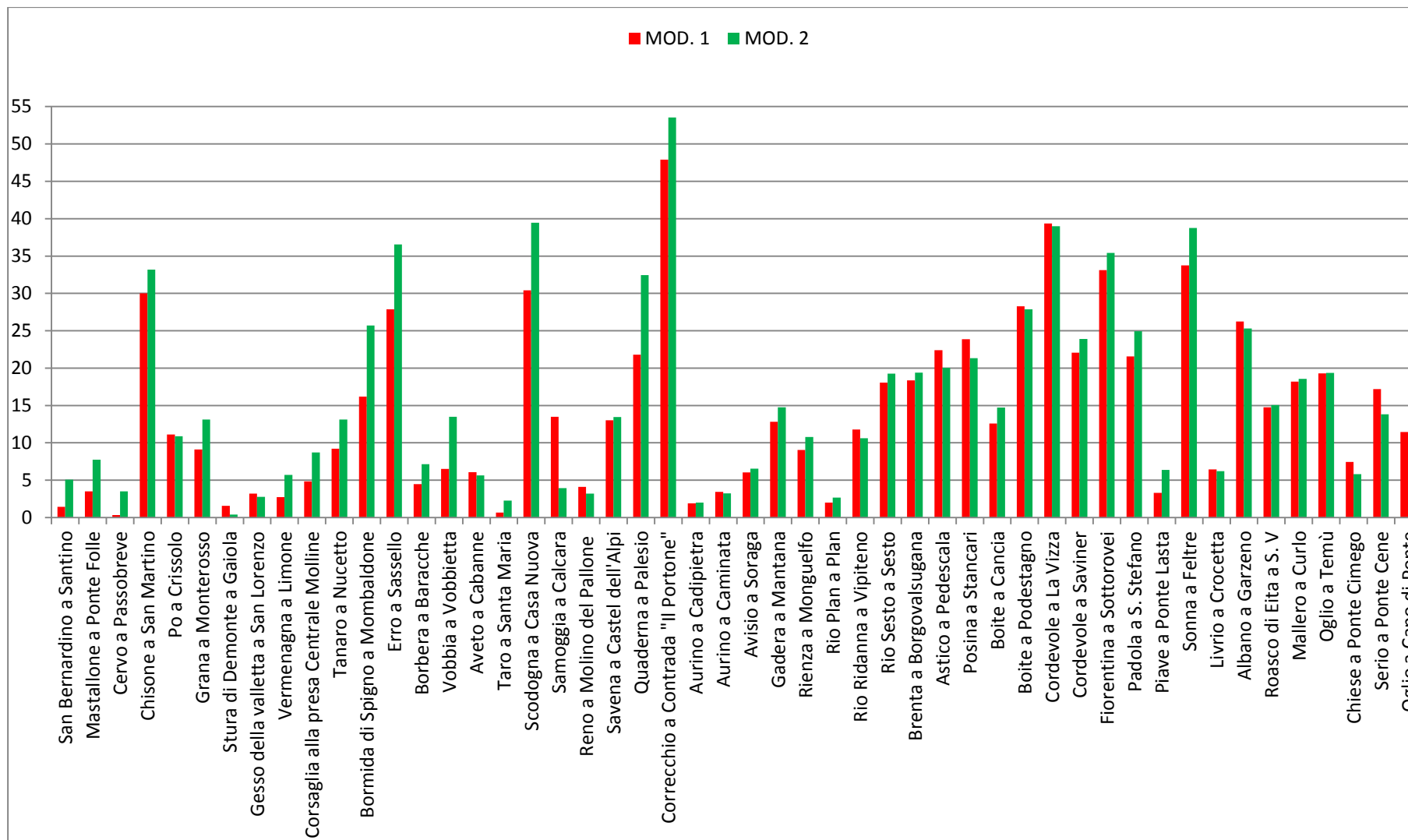


Fig. 7.21 Errori relativi nella stima del volume utile annuo di deflusso – Istogramma globale

7.4 Analisi di sensibilità del parametro β

All'interno dei bacini considerati, i valori di β stimati attraverso il metodo dei momenti oscillano in un range compreso tra 0,43 (Correcchio a Contrada "Il Portone") e 1,59 (Rienza a Monguelfo).

I valori di β stimati attraverso i due modelli proposti sono compresi all'interno dello stesso range, ma talvolta si discostano decisamente dai valori forniti dal metodo dei momenti. In questi casi le curve "calcolate" e stimate (vedi appendice B) non risultano ovviamente sovrapposte, ma presentano una forma diversa, a cui si può associare un errore di stima dei volumi di deflusso più o meno ampio.

Questa situazione suggerisce di analizzare in maniera più approfondita l'influenza del parametro β sul livello di precisione dei modelli proposti.

Considerando cinque bacini appartenenti alle rispettive cinque zone per i quali la stima del parametro β è risultata particolarmente precisa, è stato possibile effettuare un'analisi di tipo qualitativo verificando la variazione dell'errore relativo nella stima dei volumi totali al variare di β .

A partire dai valori di β ritrovati mediante il modello, si sono ricalcolate le curve di durata imponendo dei valori di β di volta in volta maggiori rispetto ai precedenti di 0,01 unità (0,05 unità per i valori estremi). Per ogni curva è stato poi calcolato l'errore relativo rispetto al volume totale medio osservato. Allo stesso modo si è proceduto per valori inferiori rispetto al valore iniziale di β . Attraverso questo procedimento è stato possibile ricavare dei grafici in cui si può visualizzare direttamente l'errore relativo al variare di β .

Osservando i grafici alle pagine seguenti si possono fare alcune considerazioni.

In primo luogo si nota che per tutti i bacini considerati l'errore relativo per valori di β maggiori rispetto al valore reale cresce in modo molto graduale e, raggiunti dei valori sufficientemente elevati di β , tende a mantenersi costante. Al contrario, per valori di β inferiori a quello reale, l'errore relativo cresce in modo molto rapido e i singoli incrementi aumentano costantemente.

In seconda battuta è importante osservare che per i bacini caratterizzati da un valore di β nettamente inferiore all'unità, ovvero i bacini che presentano le maggiori caratteristiche torrentizie, l'aumento dell'errore diventa significativo anche per piccoli scostamenti dal valore reale di β .

Se si confrontano ad esempio i grafici relativi al Borbera a Baracche e all'Aurino a Caminata, rispettivamente quelli aventi il β reale inferiore e maggiore tra quelli analizzati, si può notare che nel primo caso una diminuzione di β di 0,1 conduce ad un errore relativo di circa il 50%, mentre una diminuzione di 0,15 porta già ad un errore del 100%; inoltre una sovrastima di β conduce ad un errore massimo che tende al 35%. Viceversa nel secondo caso, si può raggiungere un errore del

50% solo dopo aver ridotto β di ben 0,4 punti; l'errore massimo per sovrastima tende in questo caso al 10%.

Tali comportamenti sono profondamente diversi e permettono di affermare che la stima di β è tanto più delicata quanto più è piccolo il suo valore effettivo. Pertanto all'interno di piccoli bacini fortemente impulsivi o torrentizi un errore anche lieve nella stima di β può causare errori grossolani nella stima della curva di durata delle portate. Per qualsiasi tipo di bacino inoltre è doveroso ricordare che gli errori maggiori derivano da sottostime di β .

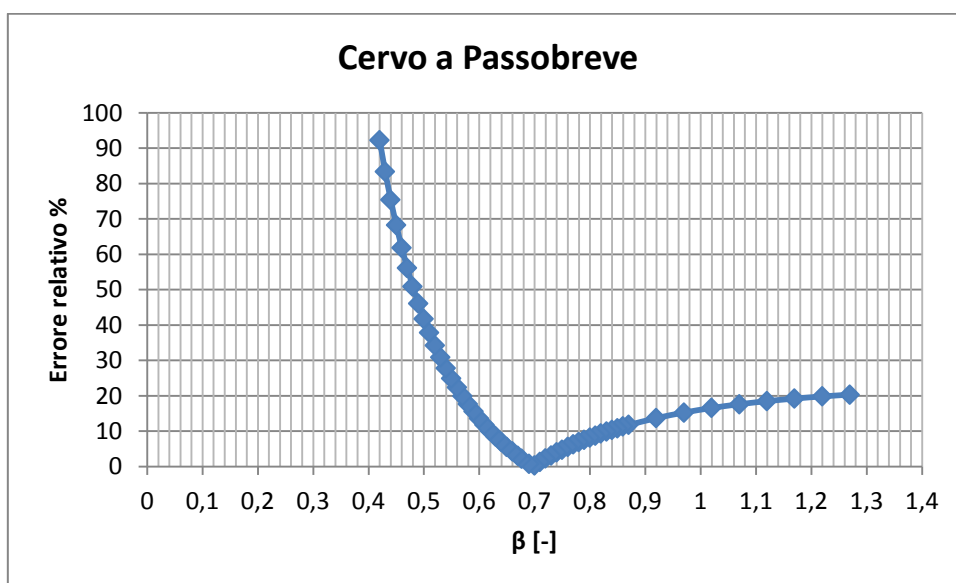


Fig. 7.22 Errore relativo nella stima del volume totale al variare di β . Stazione di Cervo a Passobreve

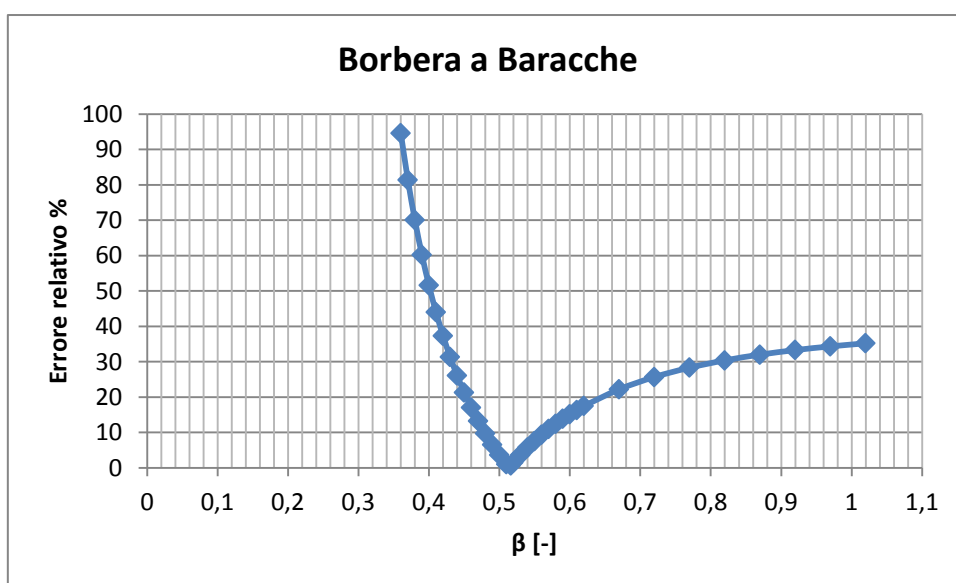


Fig. 7.23 Errore relativo nella stima del volume totale al variare di β . Stazione di Borbera a Baracche

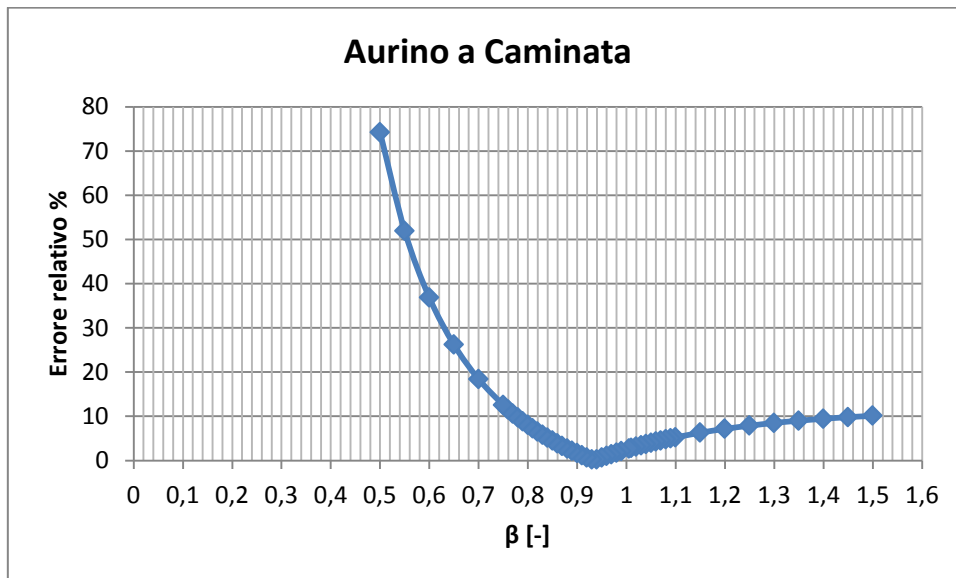


Fig. 7.24 Errore relativo nella stima del volume totale al variare di β . Stazione di Aurino a Caminata

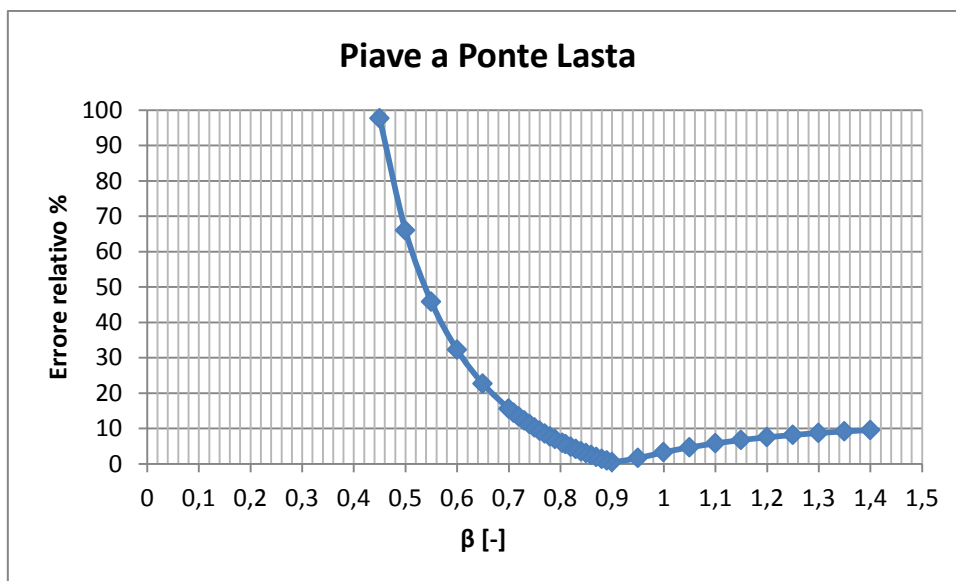


Fig. 7.25 Errore relativo nella stima del volume totale al variare di β . Stazione di Piave a Ponte Lasta

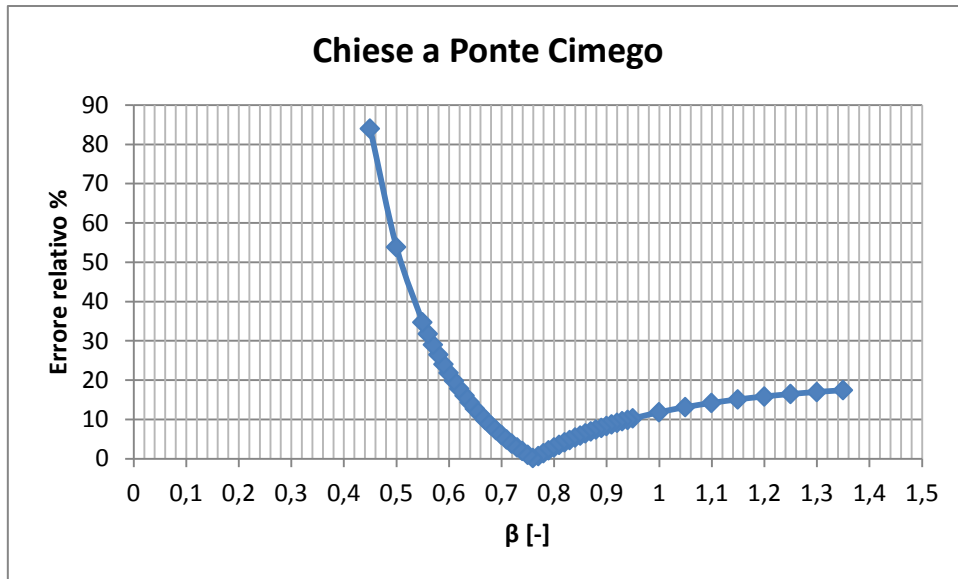


Fig. 7.26 Errore relativo nella sima del volume totale al variare di β . Stazione di Chiese a Ponte Cimego

Di seguito si riportano tre grafici di confronto per il bacino di Borbera a Baracche. Inizialmente si può osservare la curva di durata stimata attraverso il MOD. 1, caratterizzata da un errore relativo trascurabile e un β stimato pari a 0,51. Di seguito è riportata la curva di durata ottenuta applicando lo stesso modello ma imponendo un β di 0,35. Infine seguendo lo stesso criterio è riportata la curva che si ottiene imponendo un β di 1,02.

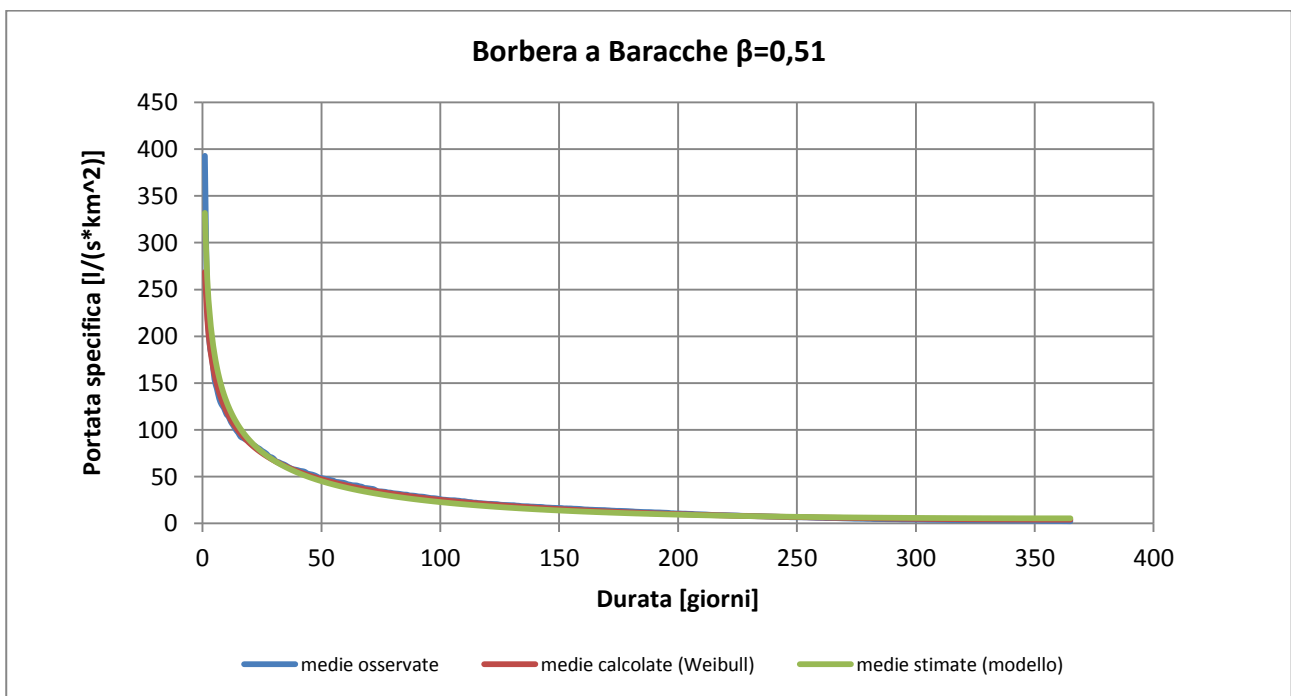


Fig. 7.27 Curve di durata medie osservate, calcolate e stimate per il Borbera a Baracche

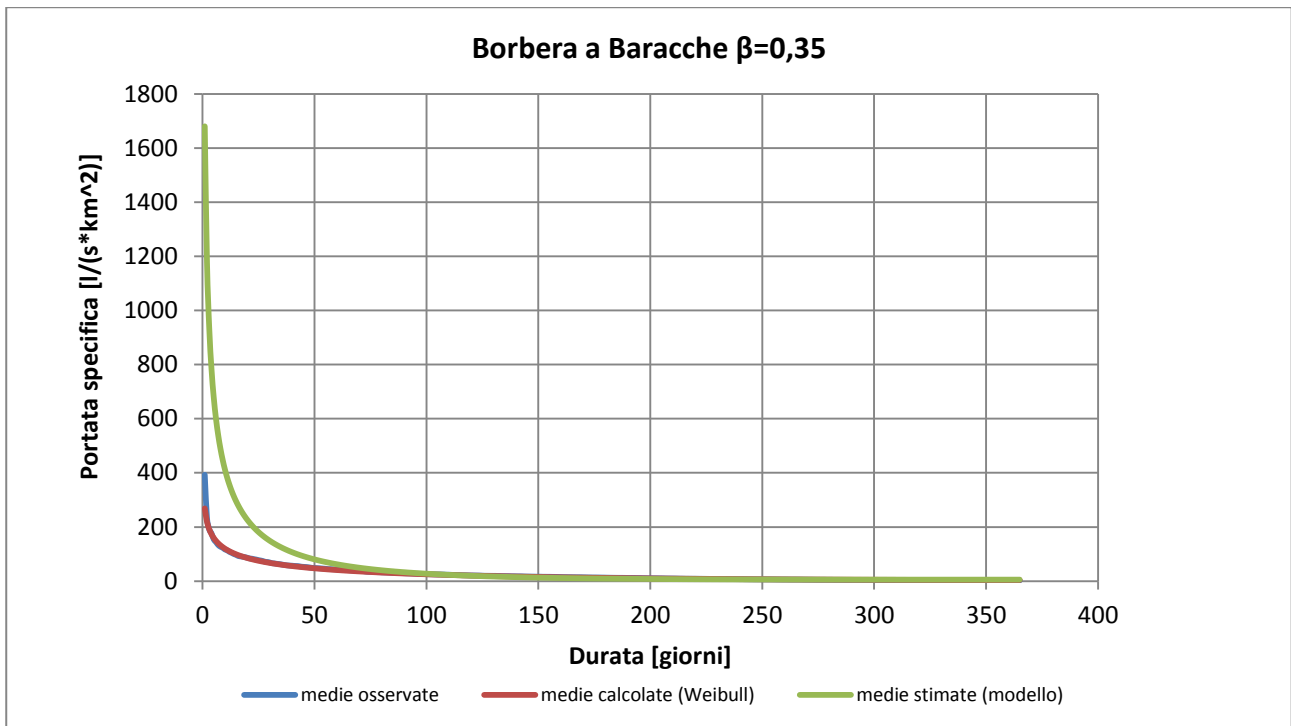


Fig. 7.28 Curve di durata medie osservate, calcolate e stimate per il Borbera a Baracche (β imposto = 0,35)

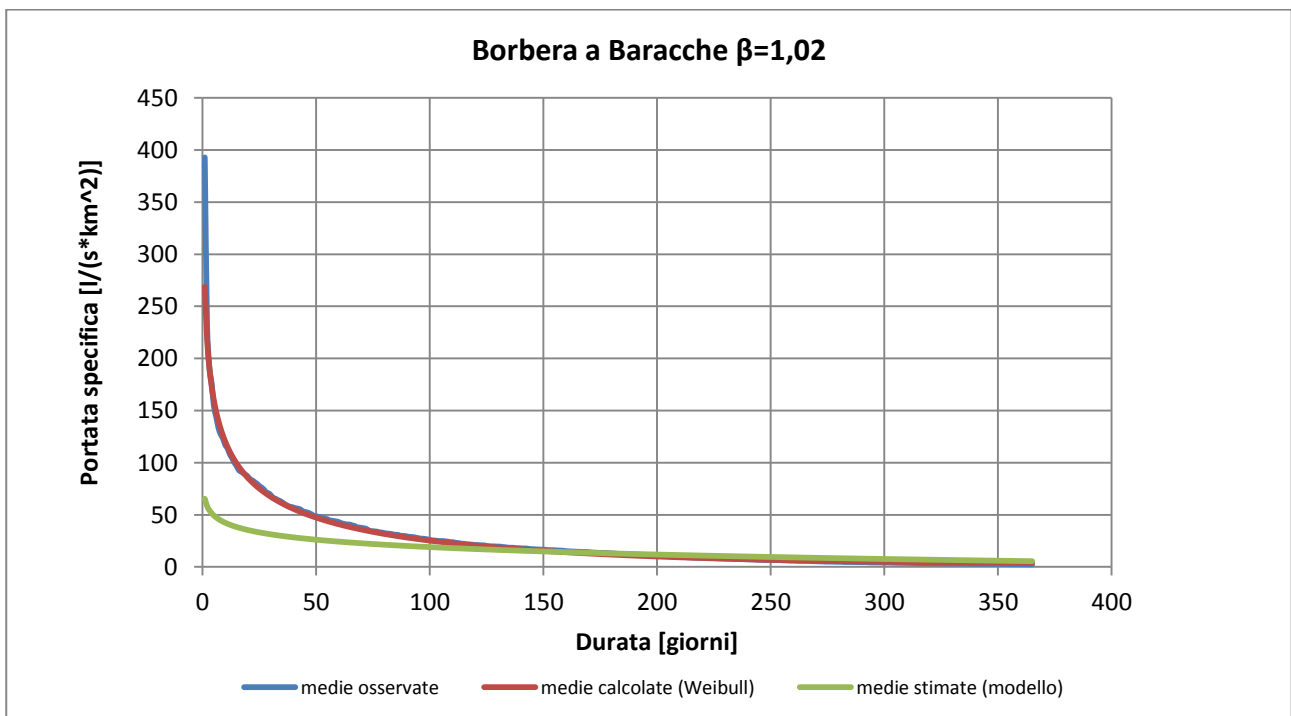


Fig. 7.29 Curve di durata medie osservate, calcolate e stimate per il Borbera a Baracche (β imposto = 1,02)

Osservando gli ultimi due grafici si può notare che per il valore di β inferiore la curva diventa molto ripida raggiungendo dei valori enormi di portata. Ciò conduce ad una sovrastima incontrollata dei volumi totali di deflusso.

Per il valore superiore di β qui considerato si ottiene invece una curva che tende ad appiattirsi rimanendo per le brevi durate al di sotto della curva di durata osservata. Ciò comporta una sottostima dei volumi totali di deflusso di entità comunque più contenuta rispetto al caso precedente. Infatti l'appiattimento della curva genera nel contempo anche una piccola sovrastima delle portate riferite alle lunghe durate che va a compensare la generale sottostima.

Conclusioni

In questo elaborato, dopo aver analizzato cinque modelli di regionalizzazione della curva di durata, applicabili rispettivamente a cinque zone geo-morfo-climaticamente omogenee dell'Italia Settentrionale, assumendo come base la distribuzione di Weibull a tre parametri e adimensionalizzando opportunamente i dati di portata dei singoli bacini considerati, sono stati sviluppati due modelli “macroregionali” per la stima delle curve di durata delle portate.

Tali modelli sono stati concepiti per essere applicati all'interno di piccoli bacini ($A < 800 \text{ km}^2$) non soggetti a regolazione e si fondano sulla notevole correlazione individuata tra il parametro adimensionale λ e la quota media del bacino e sulle autocorrelazioni osservate tra λ e i parametri di scala e di forma.

L'applicazione dei modelli ha fornito dei risultati particolarmente precisi, pur considerando che i bacini analizzati appartengono ad aree geografiche che differiscono molto tra loro per caratteristiche geomorfologiche e climatiche. In particolare bisogna notare che all'interno di un unico modello sono stati considerati bacini completamente diversi tra loro per quanto riguarda il regime pluviometrico, l'estensione e l'altitudine media.

I risultati in termini di stima del volume medio totale annuo di deflusso sono molto buoni, in quanto si sono ottenuti degli errori relativi rispetto ai volumi medi annui osservati piuttosto contenuti (errore medio del 13,55% per il MOD. 1 e del 16,11% per il MOD. 2) che possono considerarsi dello stesso ordine di grandezza rispetto agli errori relativi ottenuti attraverso i modelli pregressi validi per le singole zone. Inoltre è importante sottolineare che in nessun caso, nemmeno per i bacini torrentizi poco estesi, sono stati registrati errori relativi superiori al 50%.

Le stime dei volumi medi annui utili, riferiti ad una portata di progetto a cui corrisponde una durata di 30 giorni, hanno condotto a risultati altrettanto buoni, ma hanno evidenziato come si possano distinguere in maniera più netta, all'interno della macroregione osservata, zone entro le quali i due modelli godono di un livello di precisione maggiore oppure minore.

Tra i due modelli proposti è generalmente preferibile scegliere il primo (MOD. 1) in quanto l'errore medio ad esso associato relativamente alla stima dei volumi annui medi (sia utili che totali) risulta inferiore.

Attraverso l'analisi di sensibilità del parametro β è stato possibile apprezzare in che modo una stima errata del parametro in questione influenzi la forma della curva di durata e inoltre si sono potute identificare le tipologie di bacino per cui tale stima risulta maggiormente cruciale.

E' importante notare che i modelli forniti risultano di facile implementazione in quanto, come dati di input, richiedono soltanto la quota media del bacino, la piovosità media annua e l'estensione del bacino (tutte grandezze facilmente reperibili).

Il modelli proposti rappresentano pertanto un valido strumento per poter valutare la risorsa idrica all'interno dei piccoli bacini non monitorati compresi all'interno della macroregione che include tutto l'Arco Alpino e Prealpino Italiano (ad eccezione della parte friulana) più parte dell'Appennino Ligure ed Emiliano.

Una considerazione importante può essere fatta riguardo all'esattezza del dato relativo alla piovosità media annua, che, all'interno di questi modelli, gioca un ruolo fondamentale, poiché rappresenta il punto di partenza per poter applicare la procedura di adimensionalizzazione. A tal proposito si può osservare che la variabile in questione è sempre caratterizzata da un certo grado di incertezza a causa di molteplici motivi. In primo luogo bisogna considerare la natura stocastica delle precipitazioni che richiede di disporre di una serie di dati pluviometrici quanto più possibile lunga per poter ottenere un valore medio attendibile. Successivamente bisogna considerare che in passato i pluviometri hanno tendenzialmente sottostimato l'altezza annuale di precipitazione, specialmente in presenza di precipitazioni nevose. Infine bisogna ricordare che l'altezza annua media di pioggia talvolta corrisponde al valore dato dal pluviometro più vicino alla stazione idrometrica di misura, mentre bisognerebbe sempre riferirsi alla precipitazione media annua ragguagliata sull'intero bacino. Una maggiore precisione sulla determinazione dell'afflusso medio annuo permetterebbe senza dubbio di ottenere dei risultati migliori.

I modelli qui presentati potrebbero inoltre essere resi più precisi utilizzando il metodo jackknife per migliorare la qualità delle relazioni di regressione necessarie alla stima dei parametri della distribuzione di Weibull.

In futuro sarebbe opportuno applicare i modelli a bacini monitorati appartenenti ad altre regioni per verificare se esiste o meno la possibilità di estenderne l'applicabilità. Sarebbe infatti molto interessante capire se questa metodologia può trovare applicazione, ad esempio, all'interno dei bacini friulani; in caso affermativo i modelli potrebbero definirsi applicabili a tutta la cerchia delle Alpi.

Allo stesso modo sarebbe utile valutare la possibilità di estendere i modelli ai grandi bacini fluviali e in generale ai bacini soggetti a regolazione.

APPENDICE A: relazioni di regressione lineare e di potenza tra i parametri adimensionali λ , ε , $\lambda-\varepsilon$ e β e le principali grandezze geomorfologiche e climatiche dei bacini

PARAMETRO λ

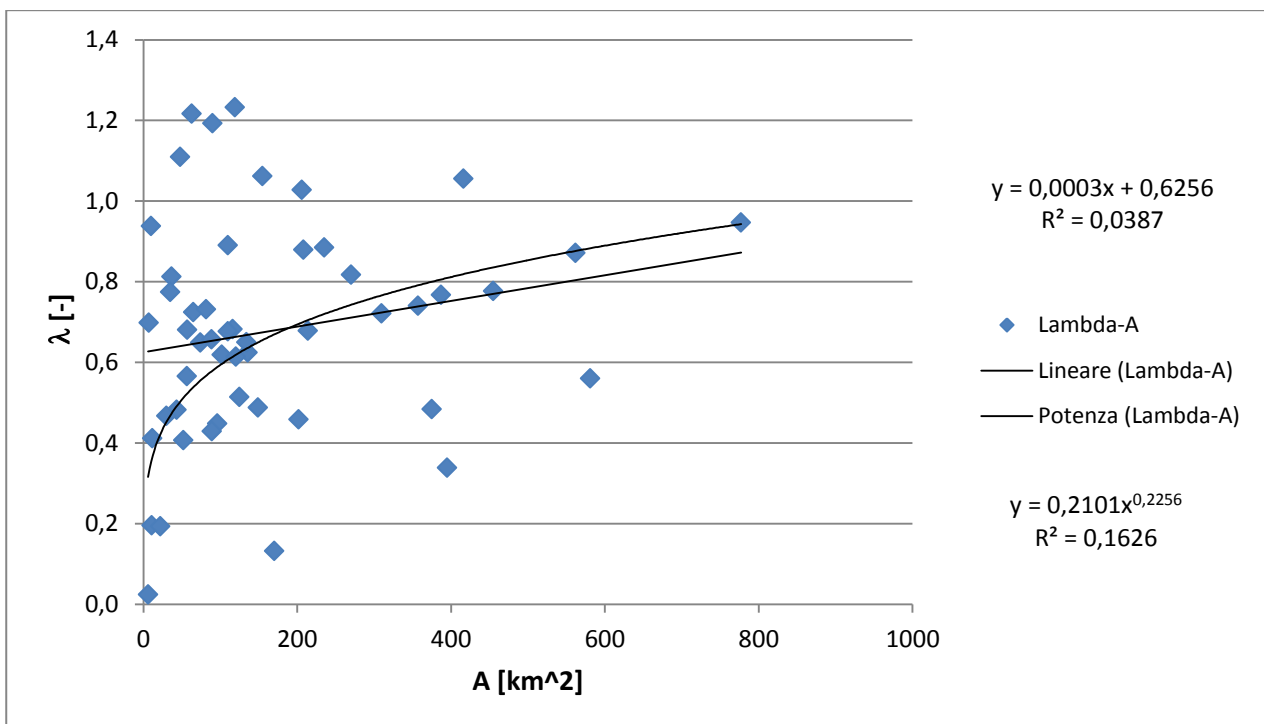


Fig. 1 Relazioni tra il parametro λ e l'area del bacino A

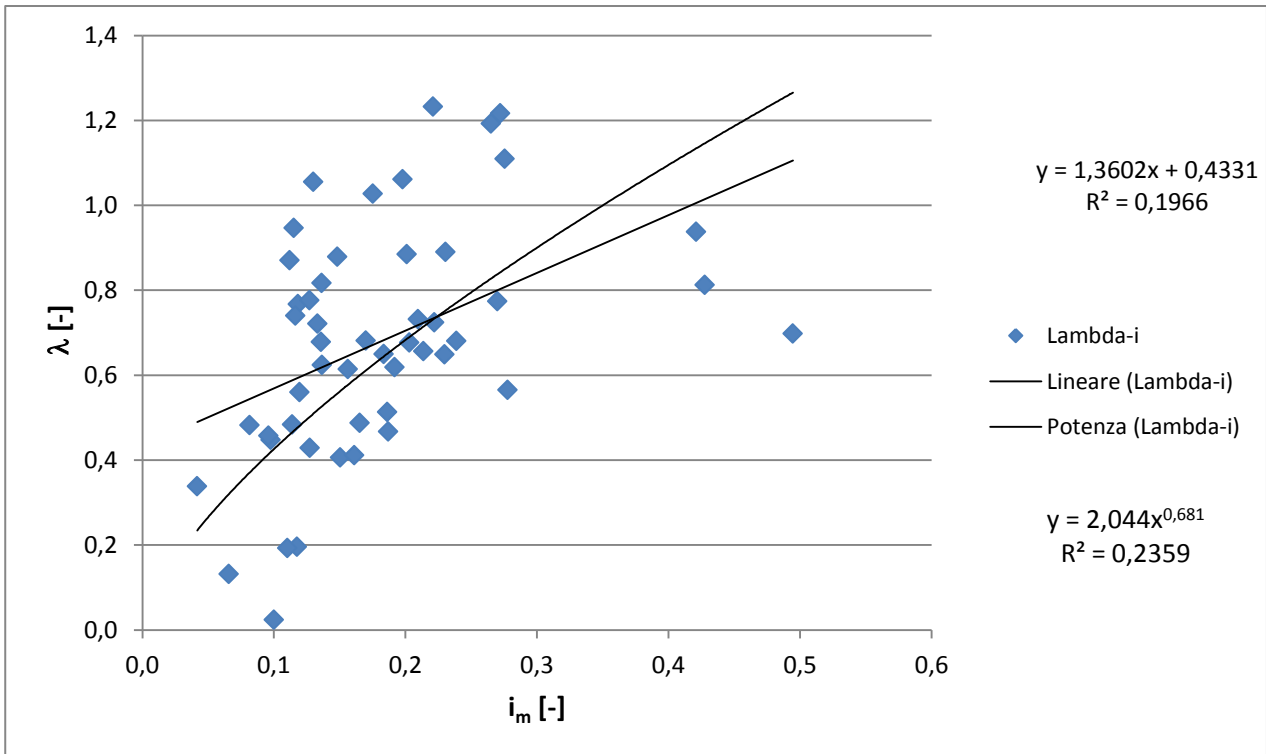


Fig. 2 Relazioni tra il parametro λ e l'inclinazione media del bacino i_m

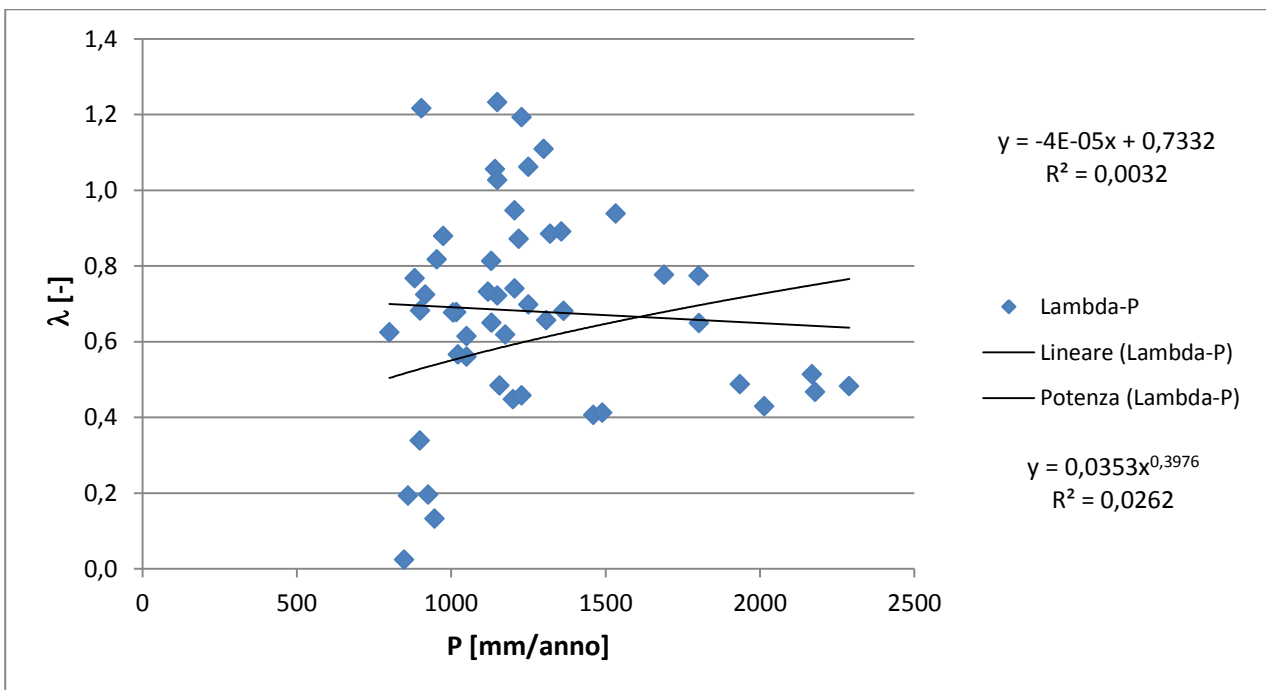


Fig. 3 Relazioni tra il parametro λ e la piovosità media annua P

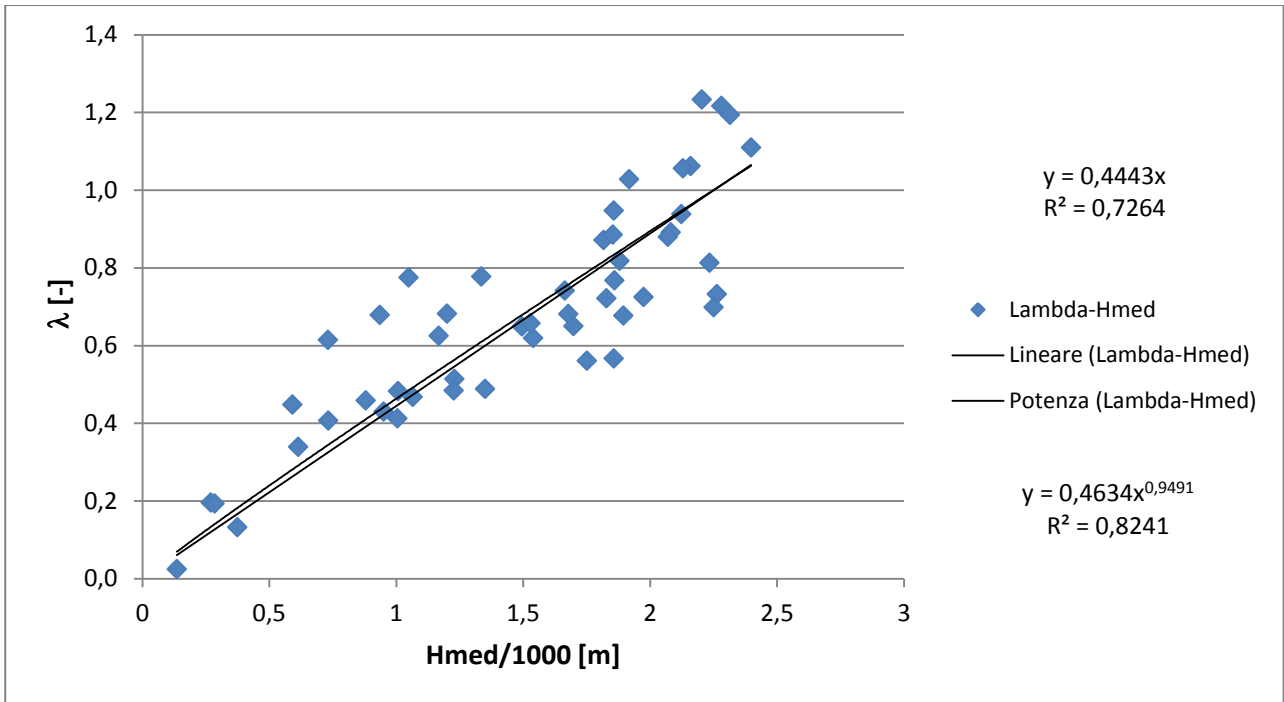


Fig. 4 Relazioni tra il parametro λ e la quota media del bacino divisa per mille

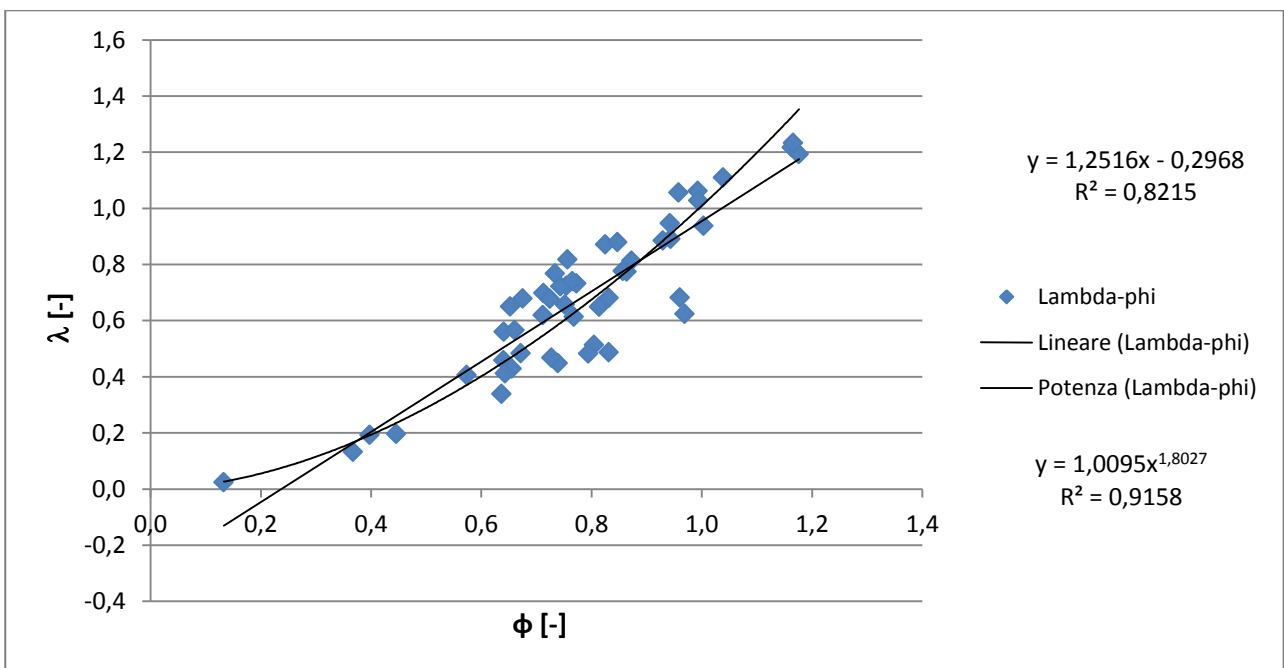


Fig. 5 Relazioni tra il parametro λ e il coefficiente di deflusso ϕ

PARAMETRO ε

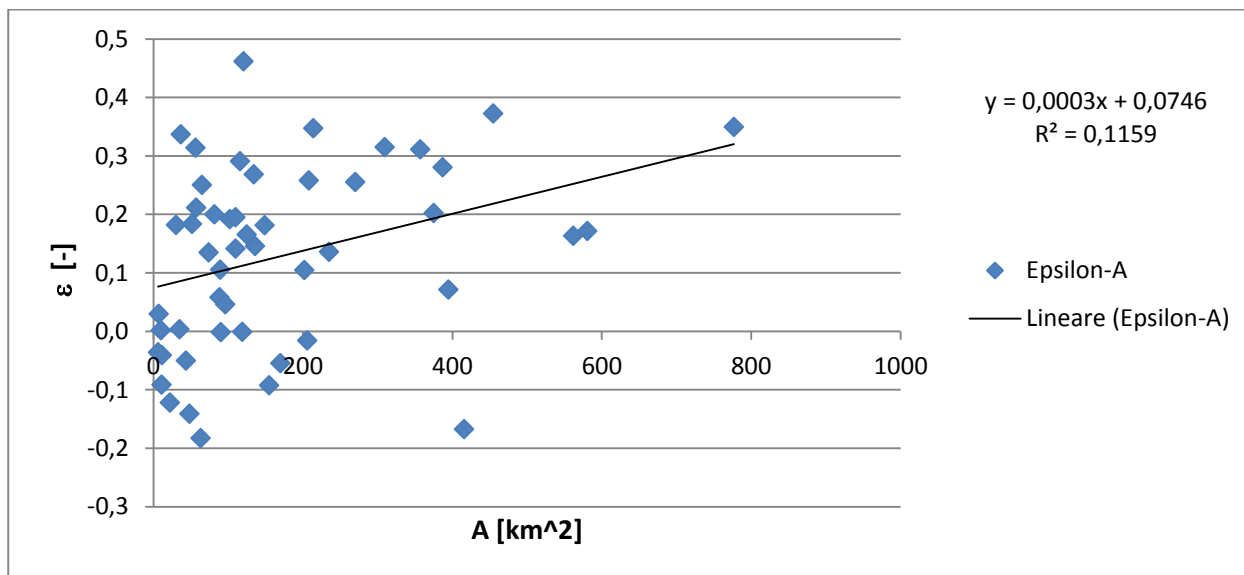


Fig. 6 Relazioni tra il parametro ε e l'area del bacino A

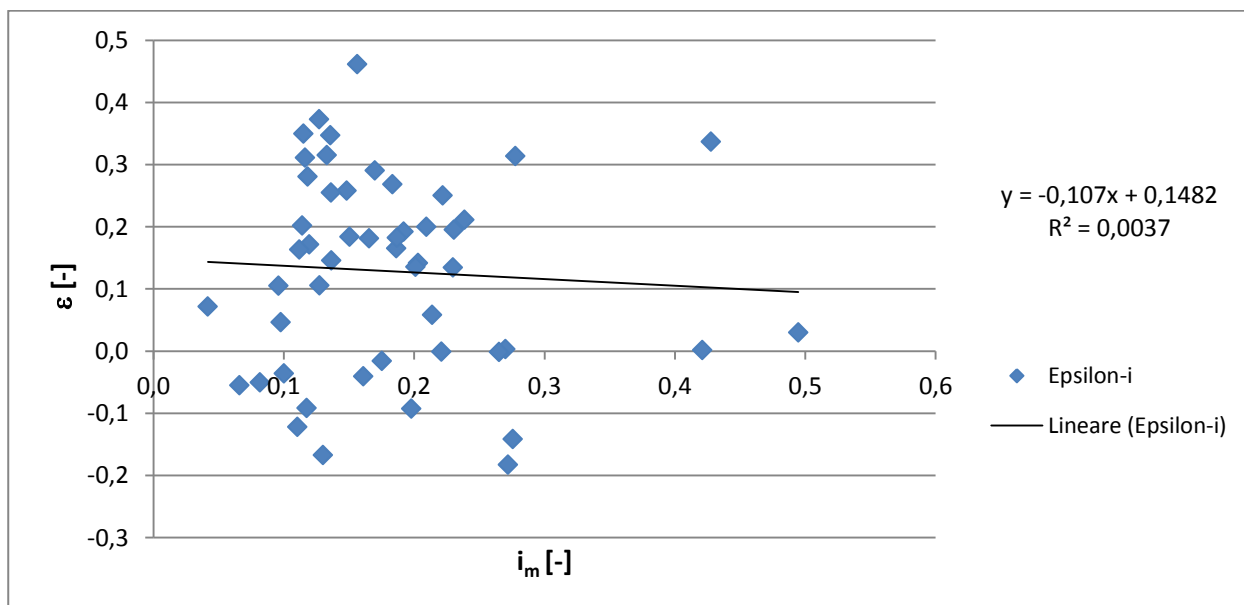


Fig. 7 Relazioni tra il parametro ε e l'inclinazione media del bacino i_m

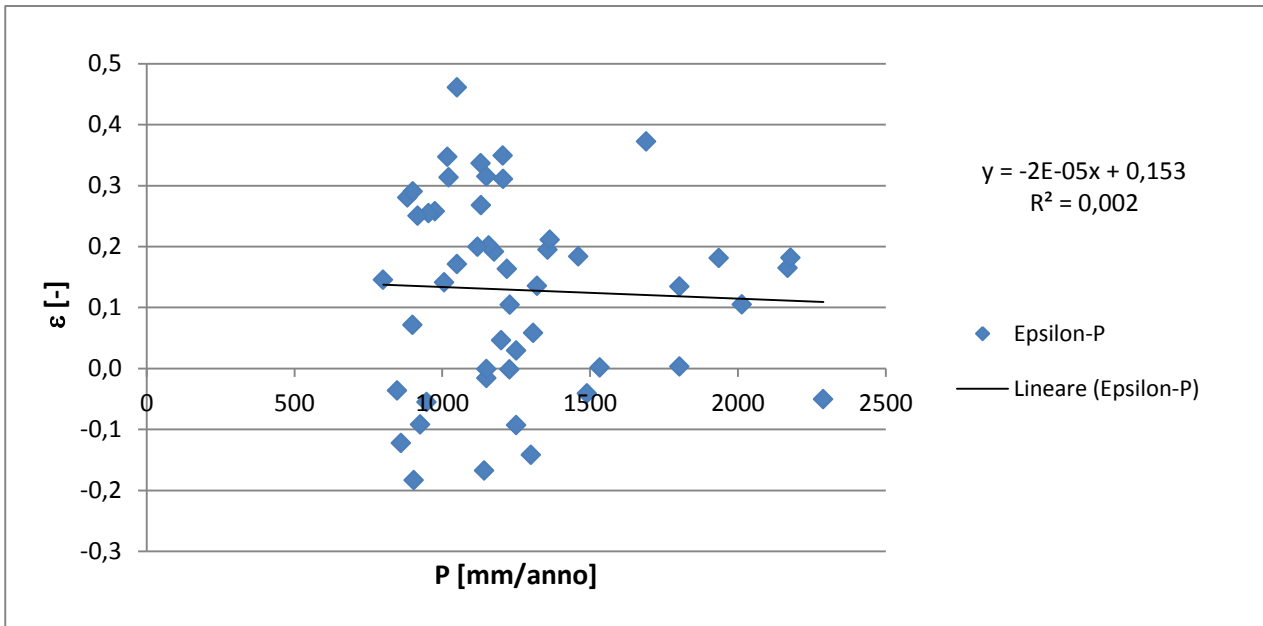


Fig. 8 Relazioni tra il parametro ϵ e la piovosità media annua P

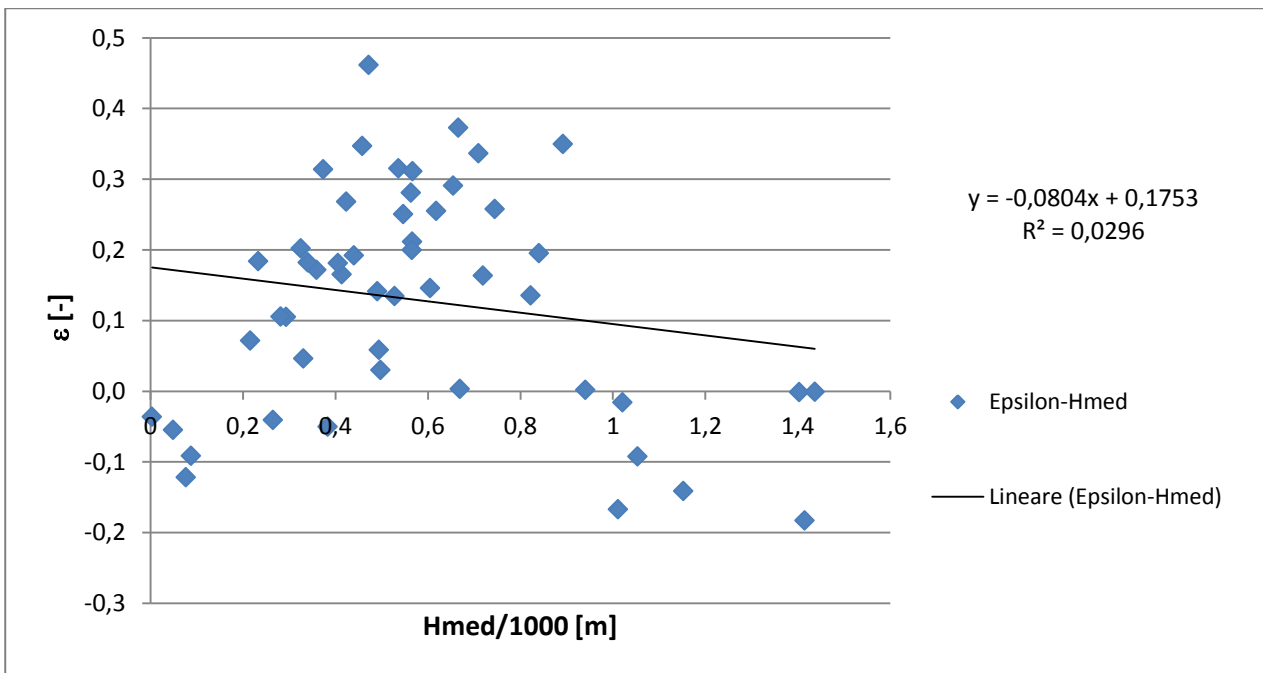


Fig. 9 Relazioni tra il parametro ϵ e la quota media del bacino divisa per mille

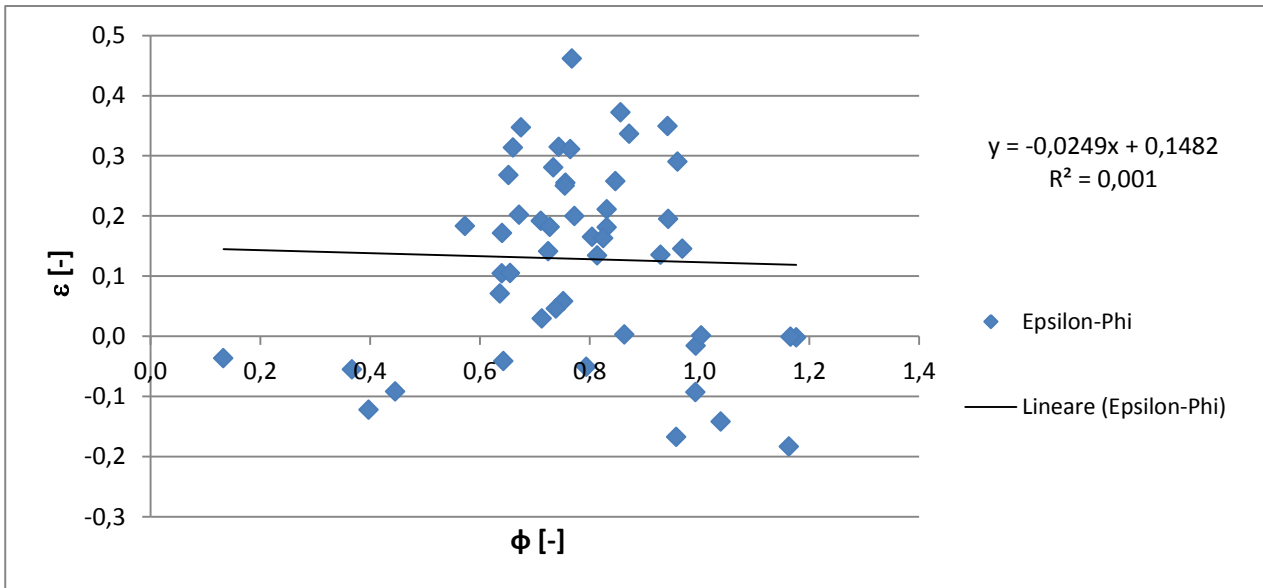


Fig. 10 Relazioni tra il parametro ϵ e il coefficiente di deflusso ϕ

PARAMETRO λ - ϵ

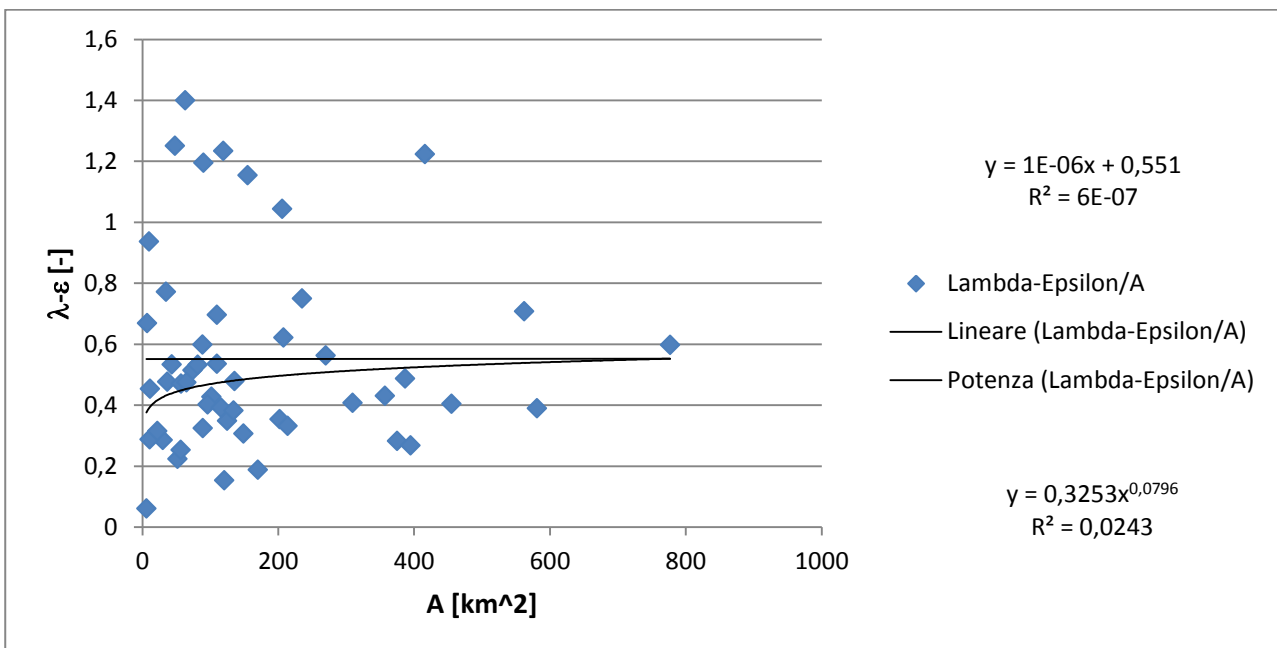


Fig. 11 Relazioni tra il parametro λ - ϵ e l'area del bacino A

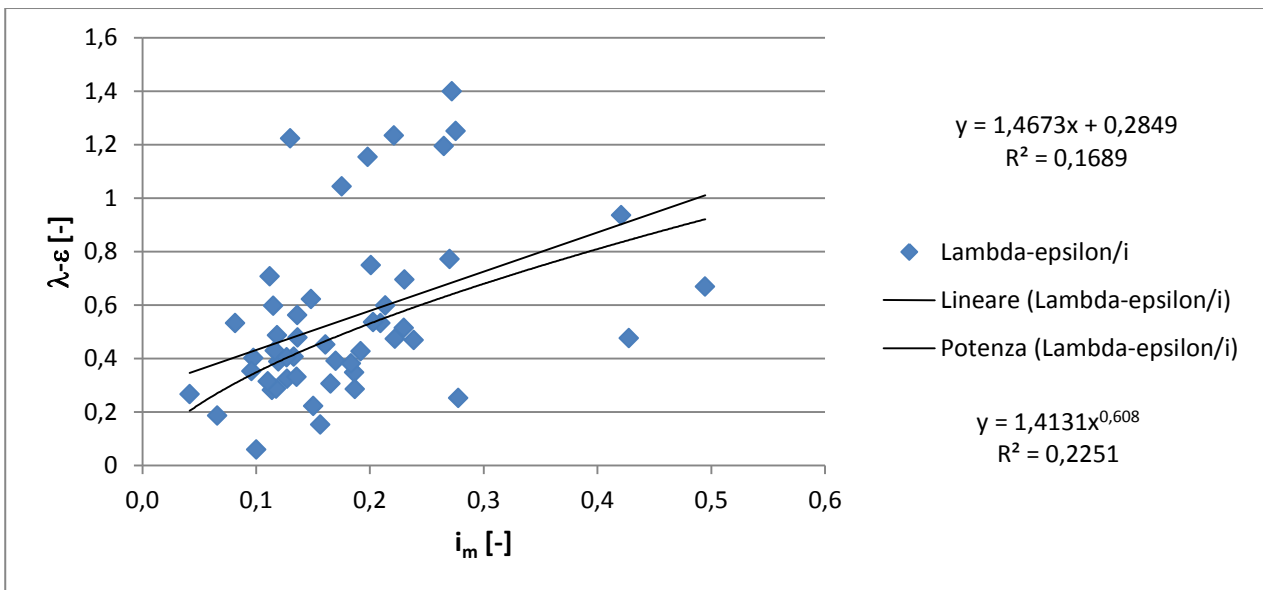


Fig. 12 Relazioni tra il parametro $\lambda-\epsilon$ e l'inclinazione media del bacino i_m

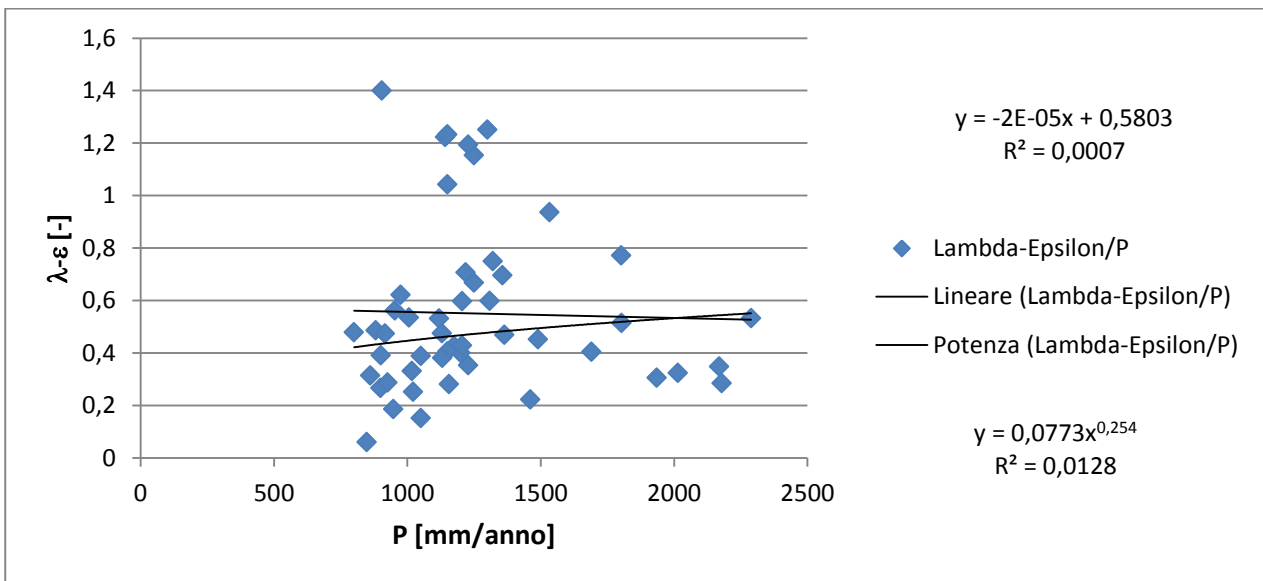


Fig. 13 Relazioni tra il parametro $\lambda-\epsilon$ e la piovosità media annua P

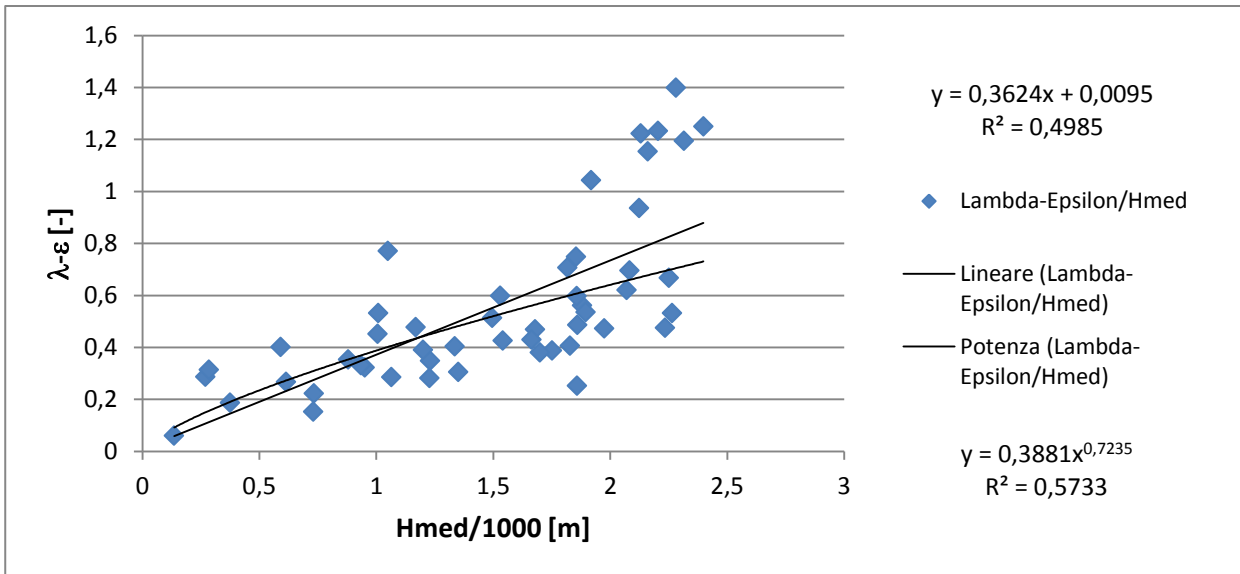


Fig. 14 Relazioni tra il parametro $\lambda-\varepsilon$ e la quota media del bacino divisa per mille

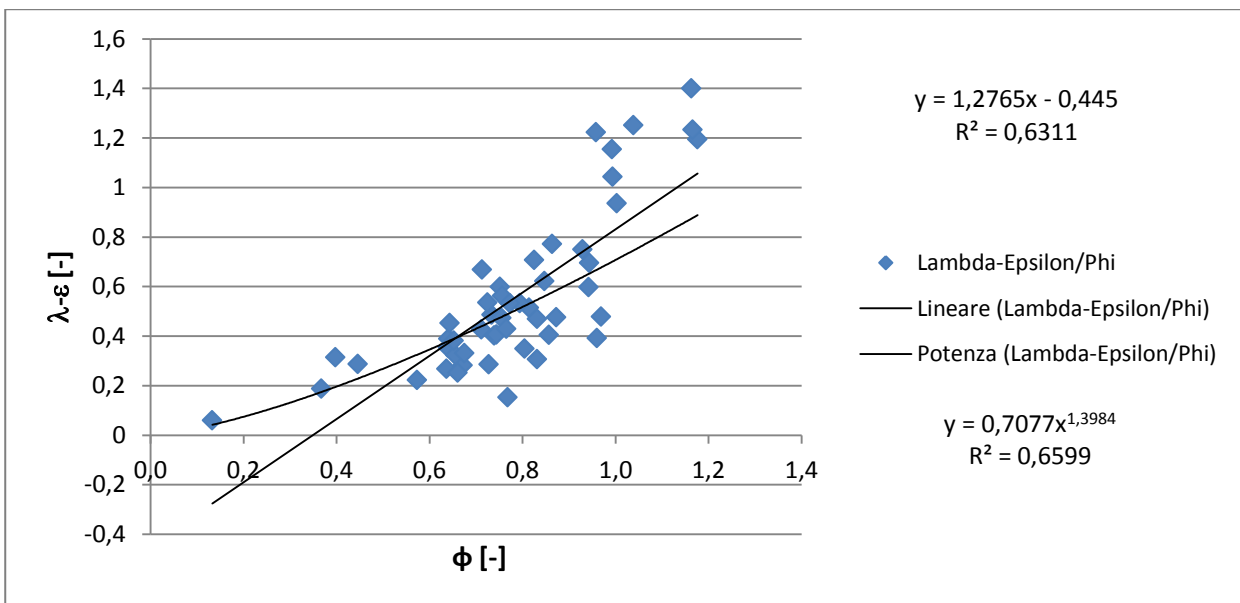


Fig. 15 Relazioni tra il parametro $\lambda-\varepsilon$ e il coefficiente di deflusso ϕ

PARAMETRO β

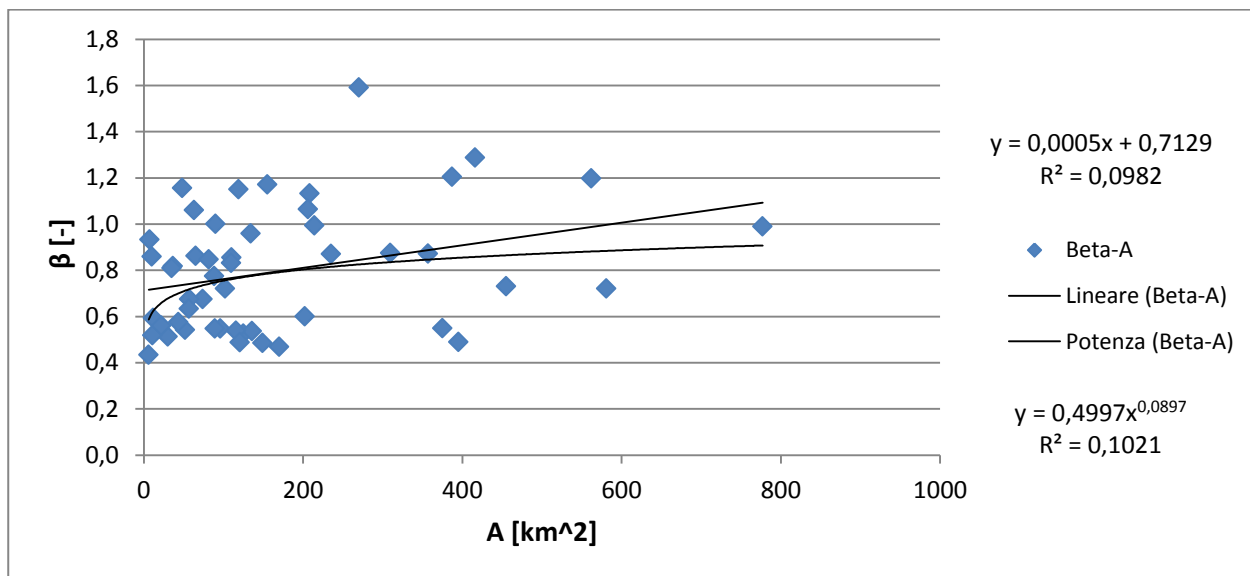


Fig. 16 Relazioni tra il parametro β e l'area del bacino A

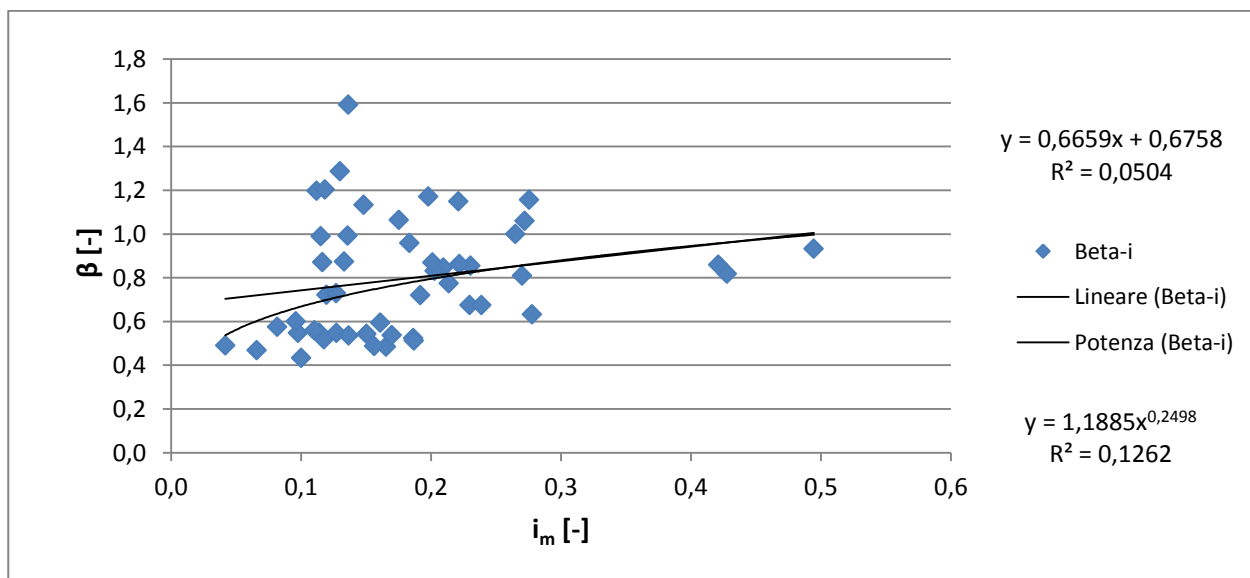


Fig. 17 Relazioni tra il parametro β e l'inclinazione media del bacino i_m

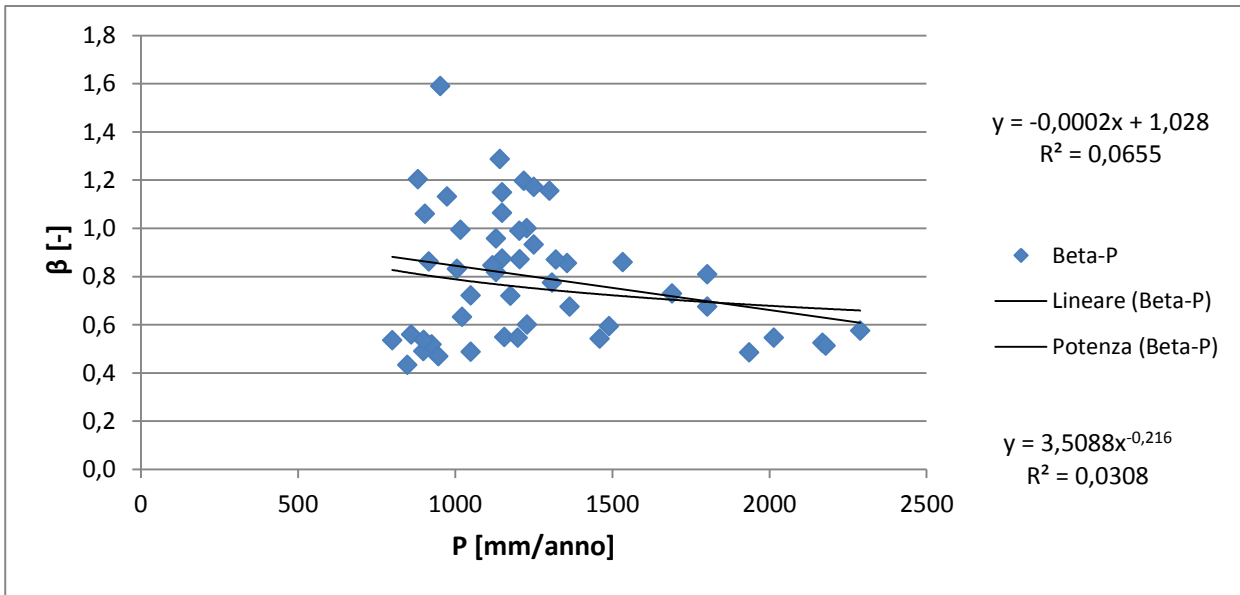


Fig. 18 Relazioni tra il parametro β e la piovosità media annua P

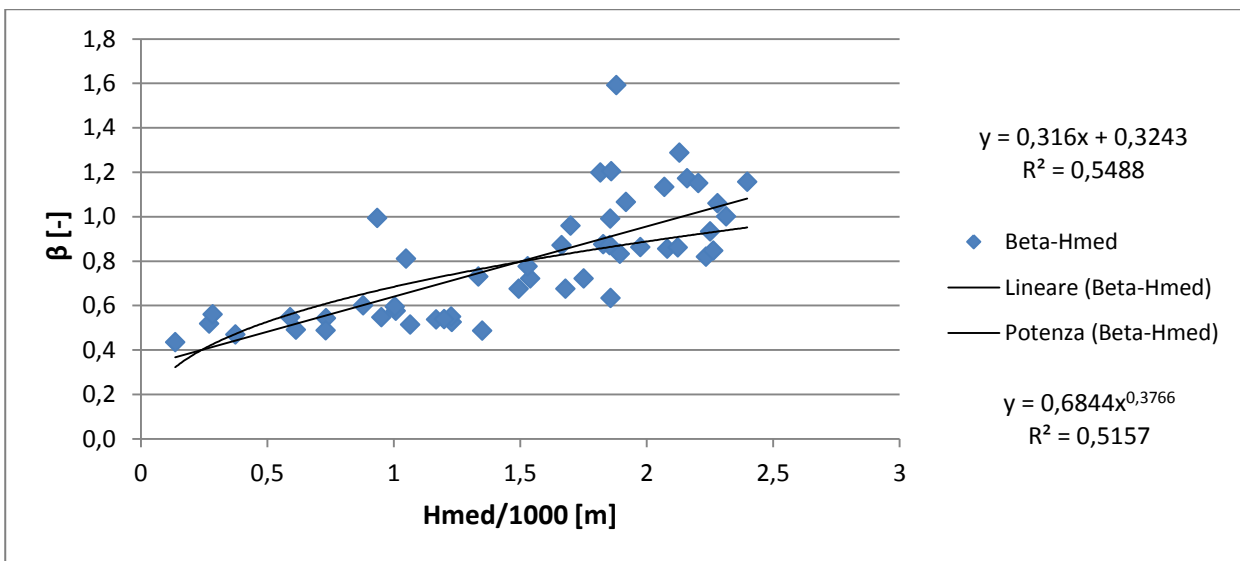


Fig. 19 Relazioni tra il parametro β e la quota media del bacino divisa per mille

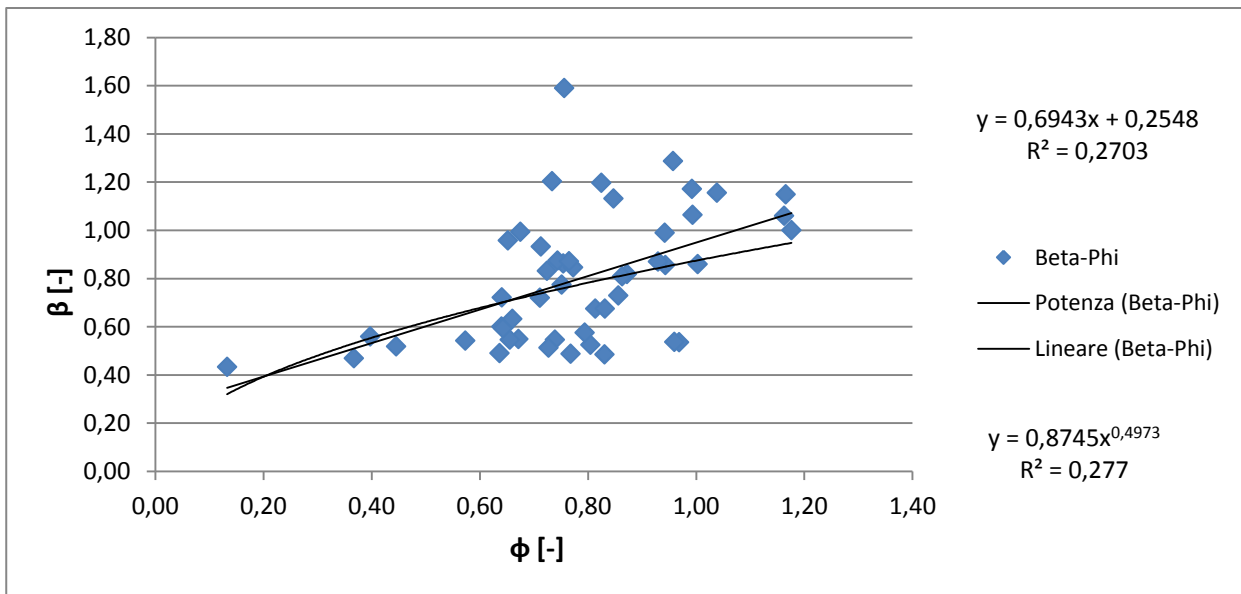


Fig. 20 Relazioni tra il parametro β e il coefficiente di deflusso ϕ

APPENDICE B: curve di durata medie osservate, calcolate mediante la tradizionale distribuzione di Weibull a tre parametri, e stimate con il MOD. 1

N.B. Per i bacini appartenenti alle zone Adige-Brenta e Piave e per il bacino dell'Albano a Garzeno non sono riportate le curve osservate in quanto non c'è stata la possibilità di reperire le intere serie di dati di portata ma si è fatto riferimento alle medie, alle deviazioni standard e ai coefficienti di asimmetria calcolati all'interno degli elaborati pregressi

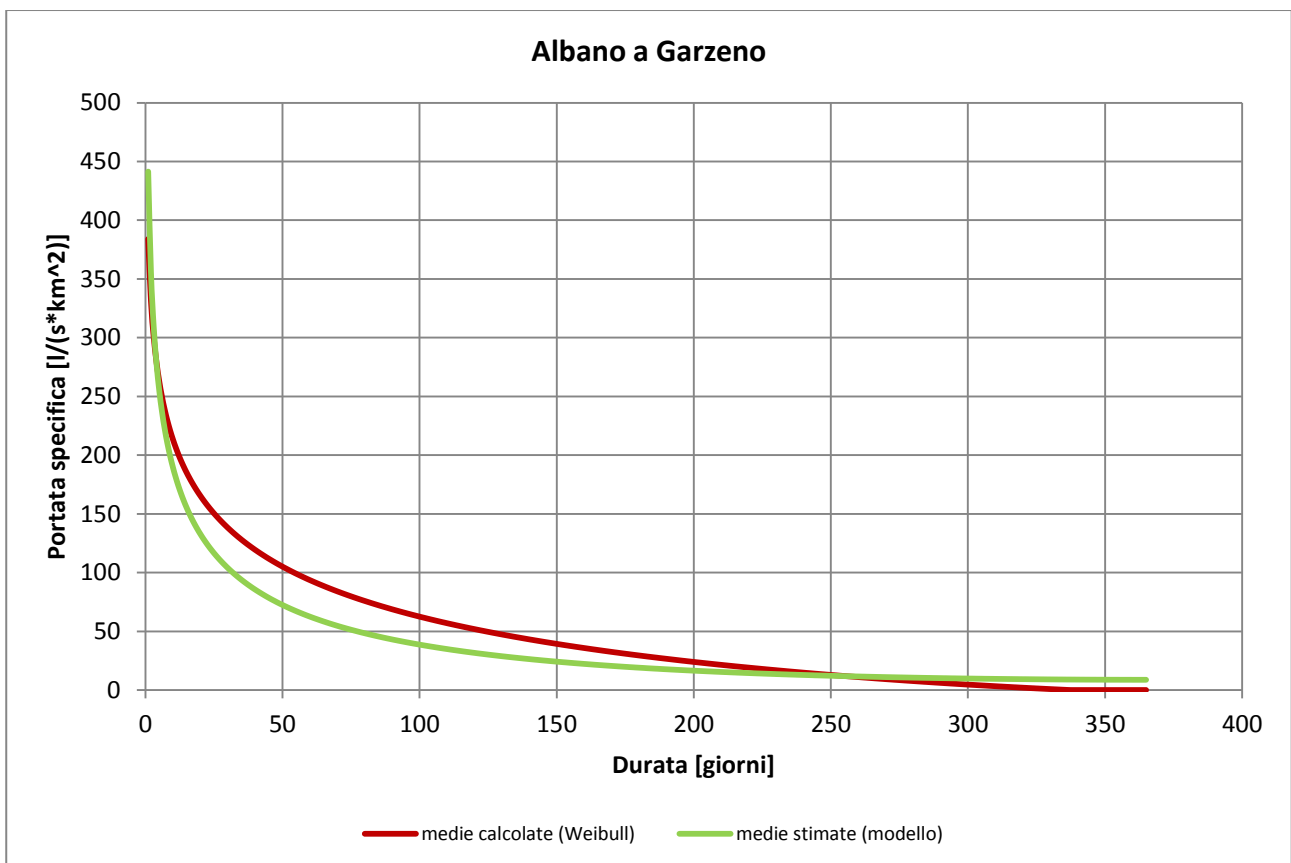


Fig. 21 Curva di durata media calcolata e stimata dell'Albano a Garzeno

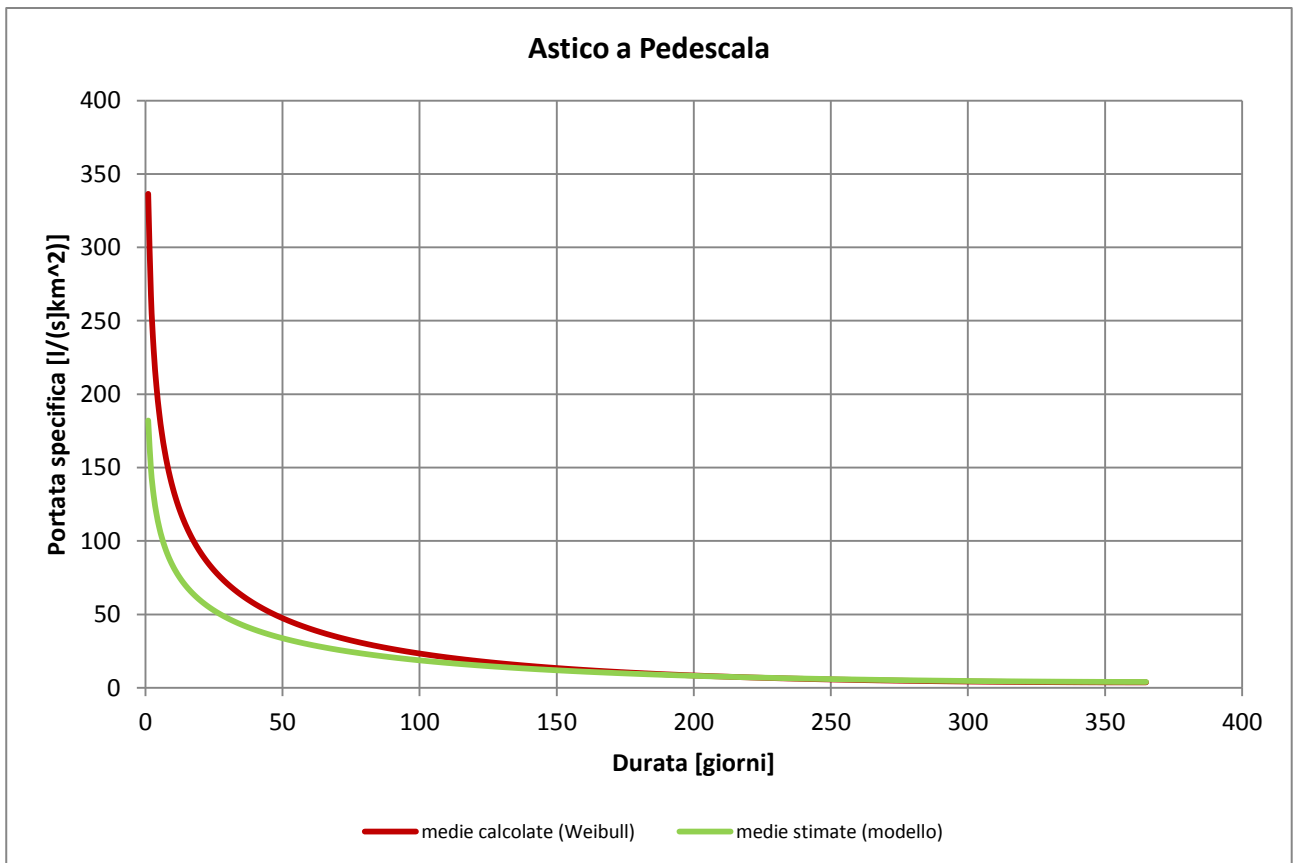


Fig. 22 Curva di durata media calcolata e stimata dell’Astico a Pedescala

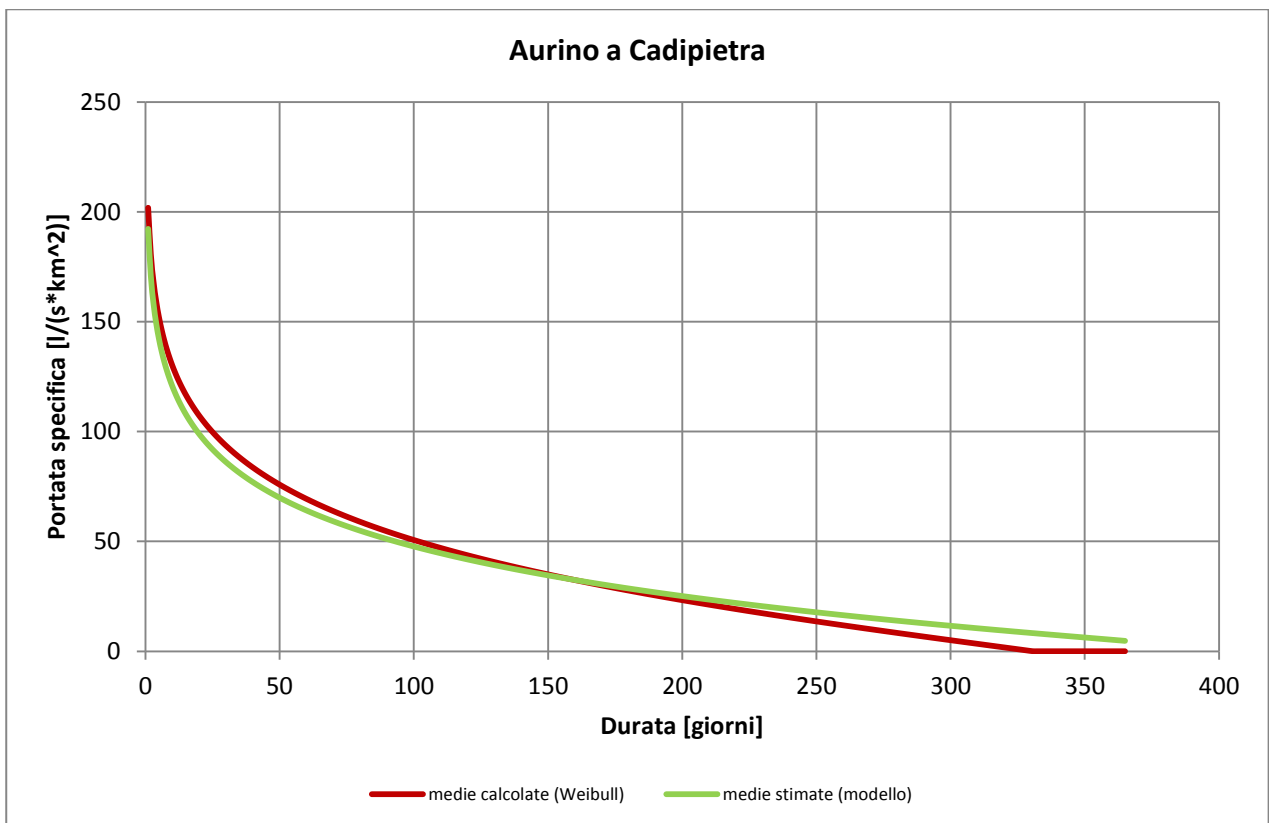


Fig. 23 Curva di durata media calcolata e stimata dell’Aurino a Cadipietra

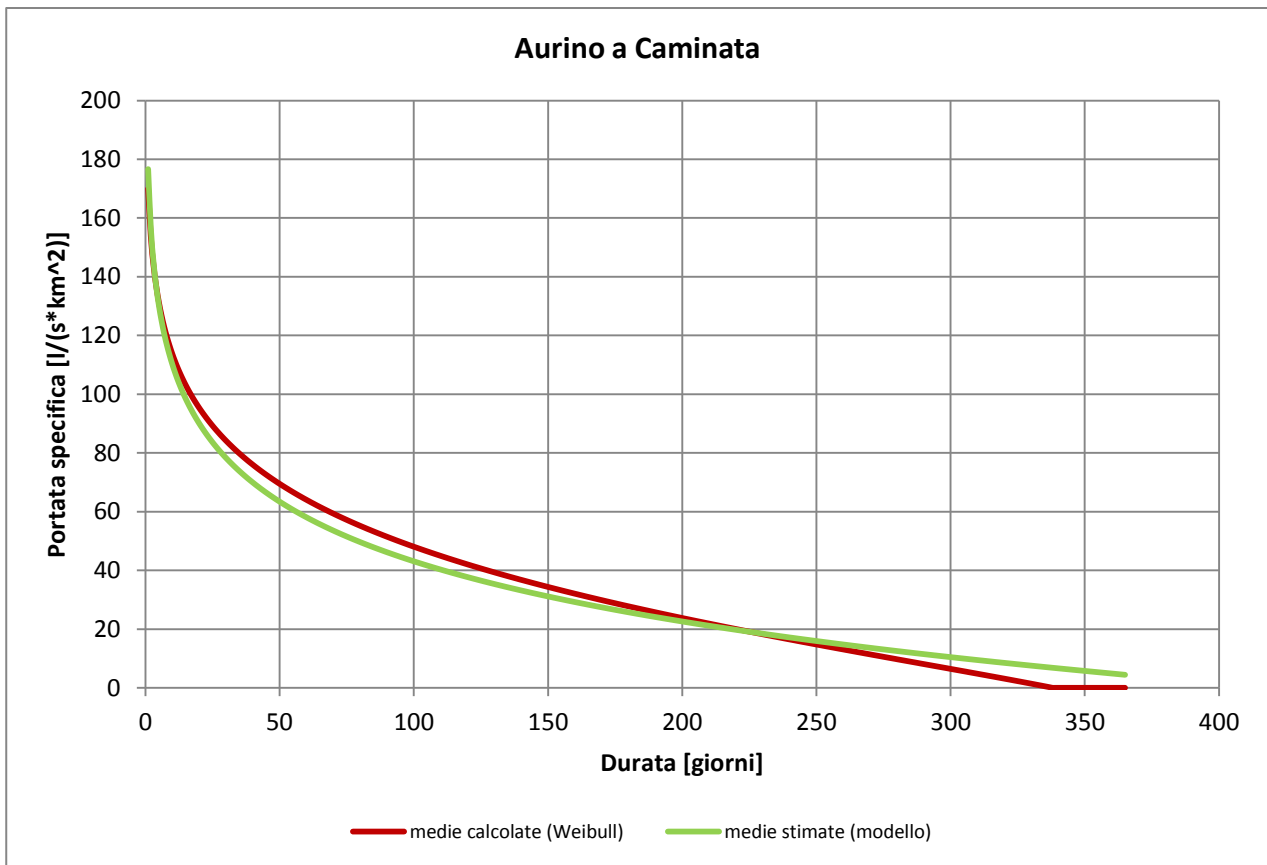


Fig. 24 Curva di durata media calcolata e stimata dell'Aurino a Caminata

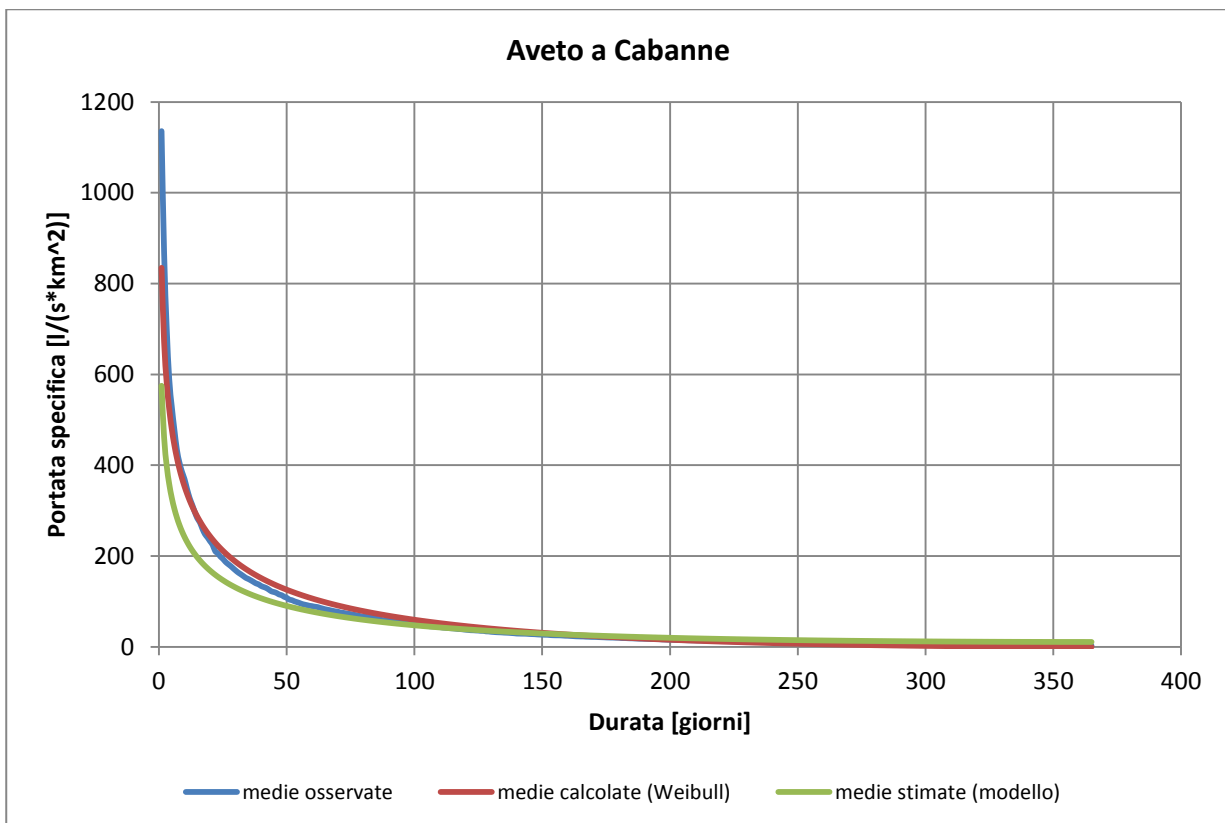


Fig. 25 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata dell'Aveto a Cabanne

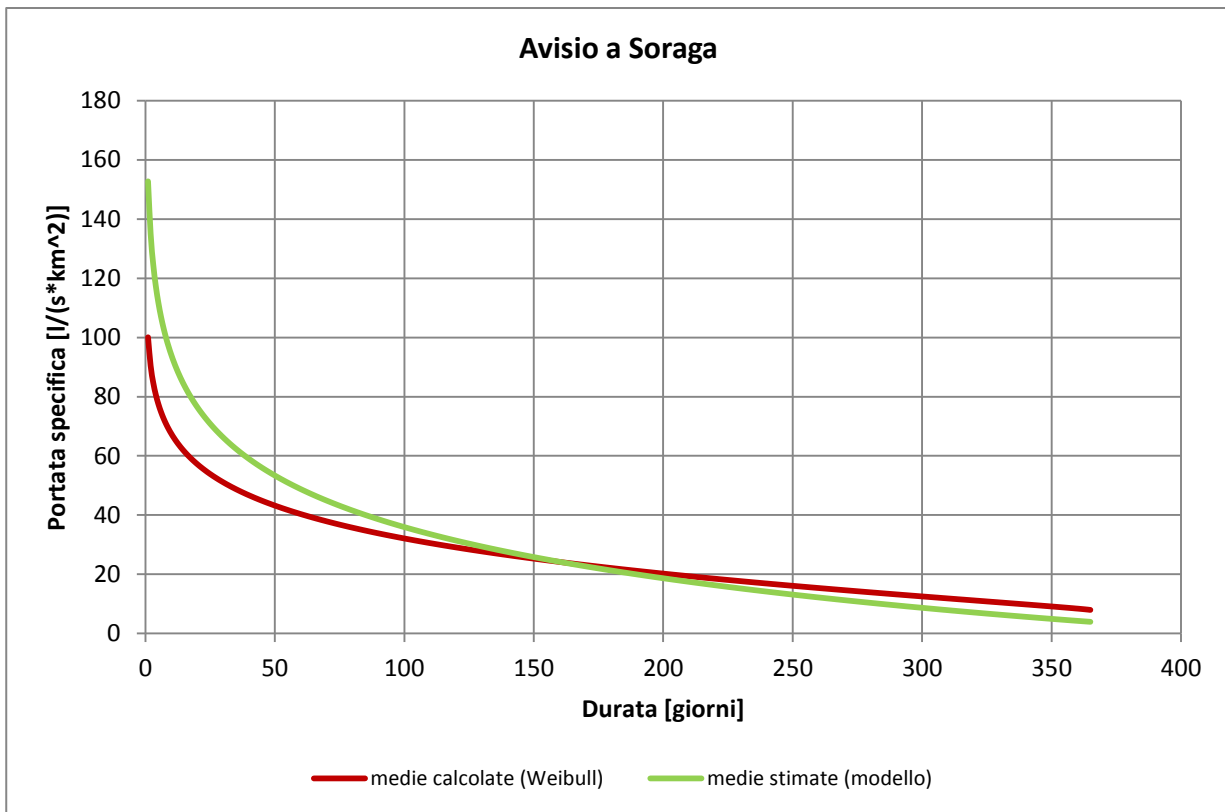


Fig. 26 Curva di durata media calcolata e stimata dell'Avisio a Soraga

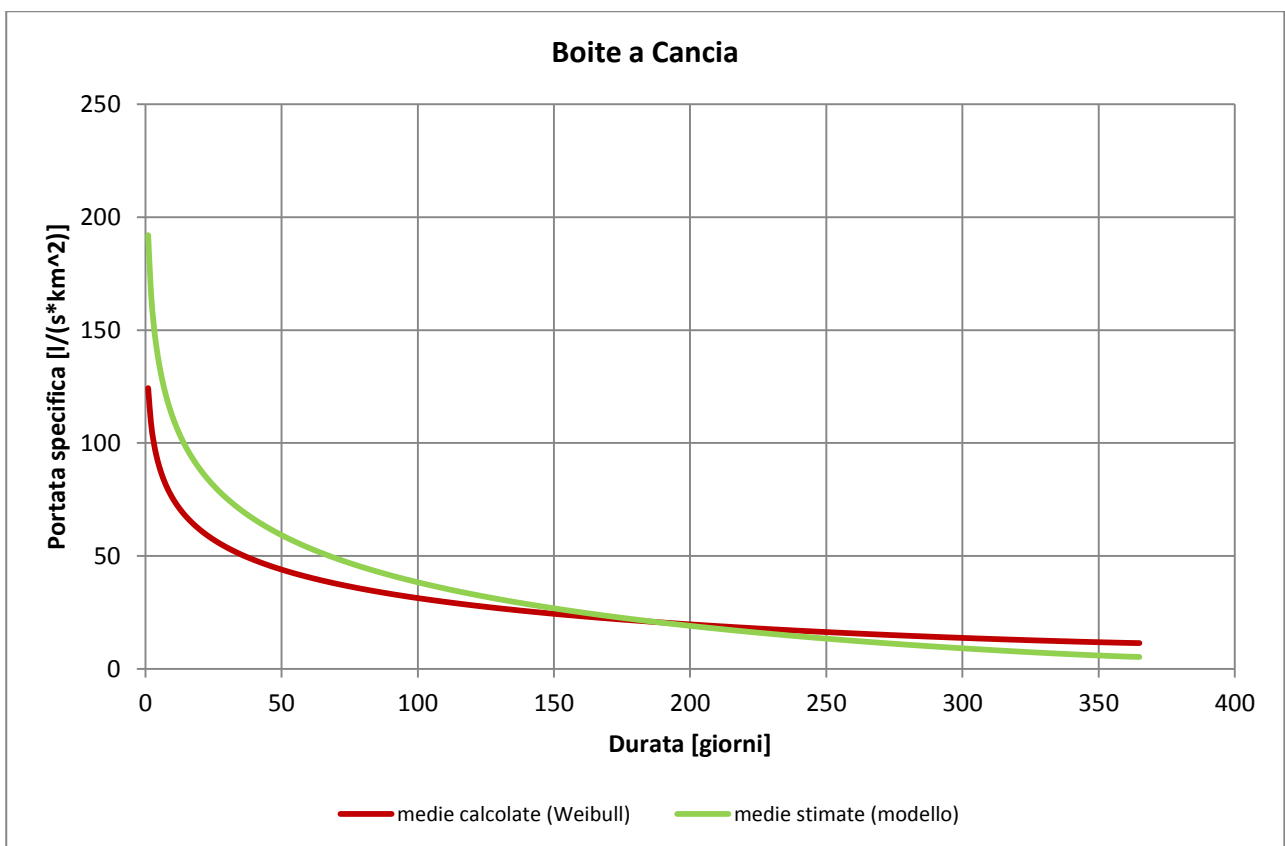


Fig. 27 Curva di durata media calcolata e stimata del Boite a Cancia

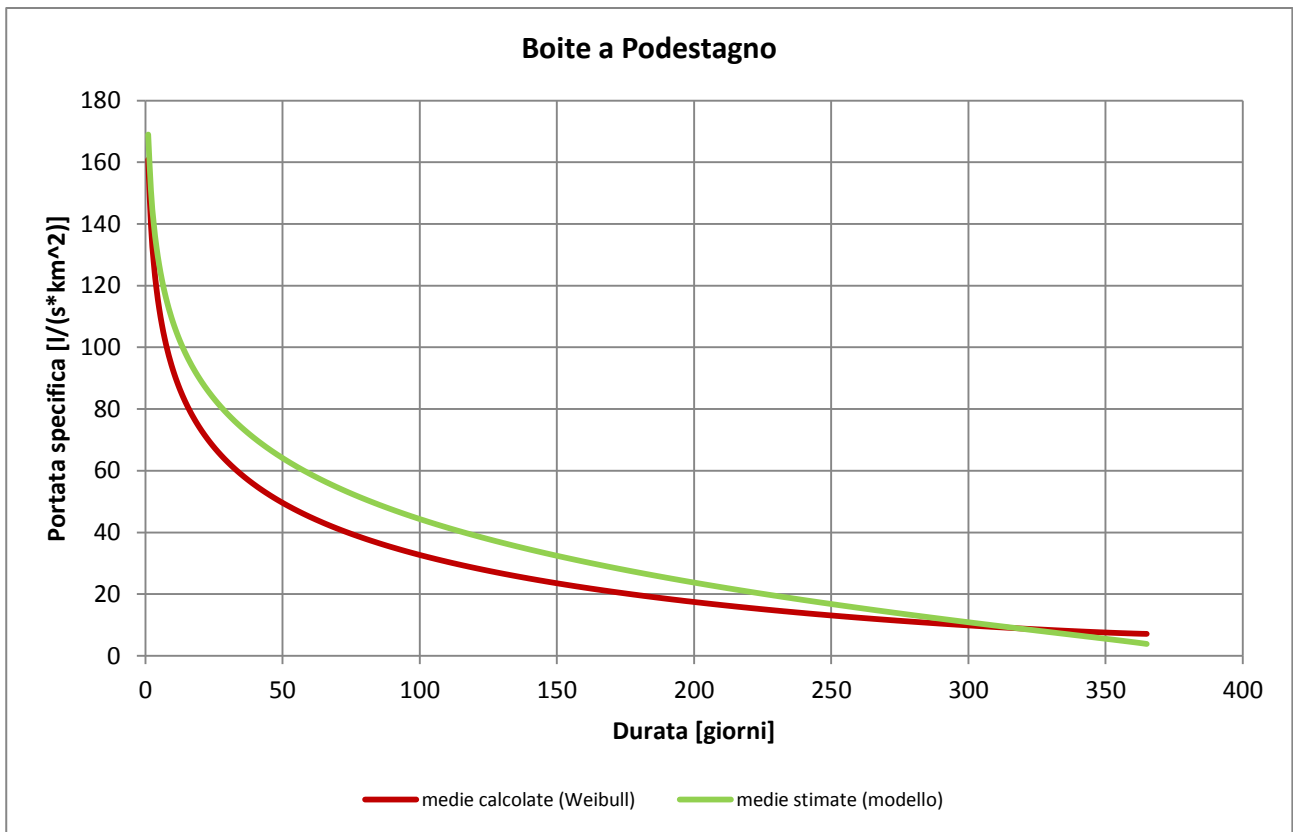


Fig. 28 Curva di durata media calcolata e stimata del Boite a Podestagno

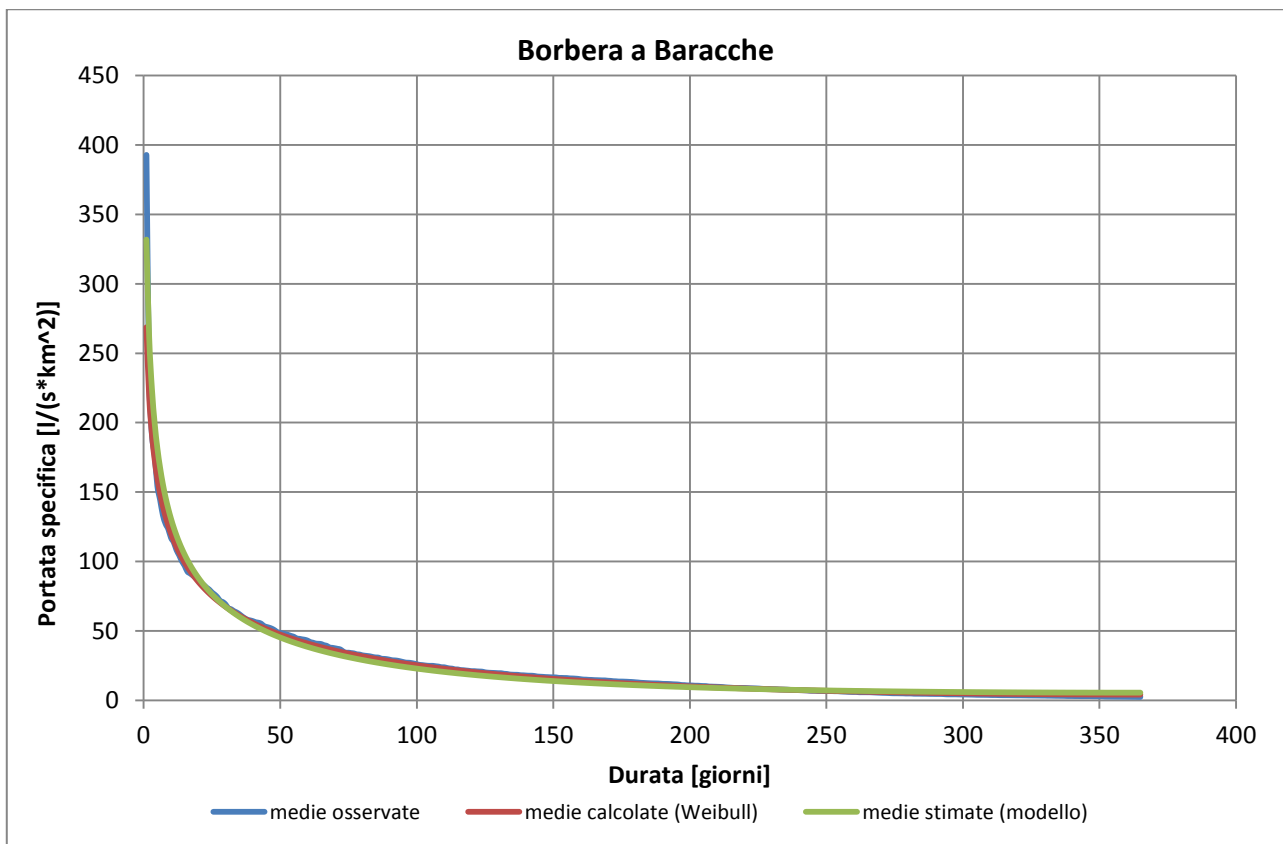


Fig. 29 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Borbera a Baracche

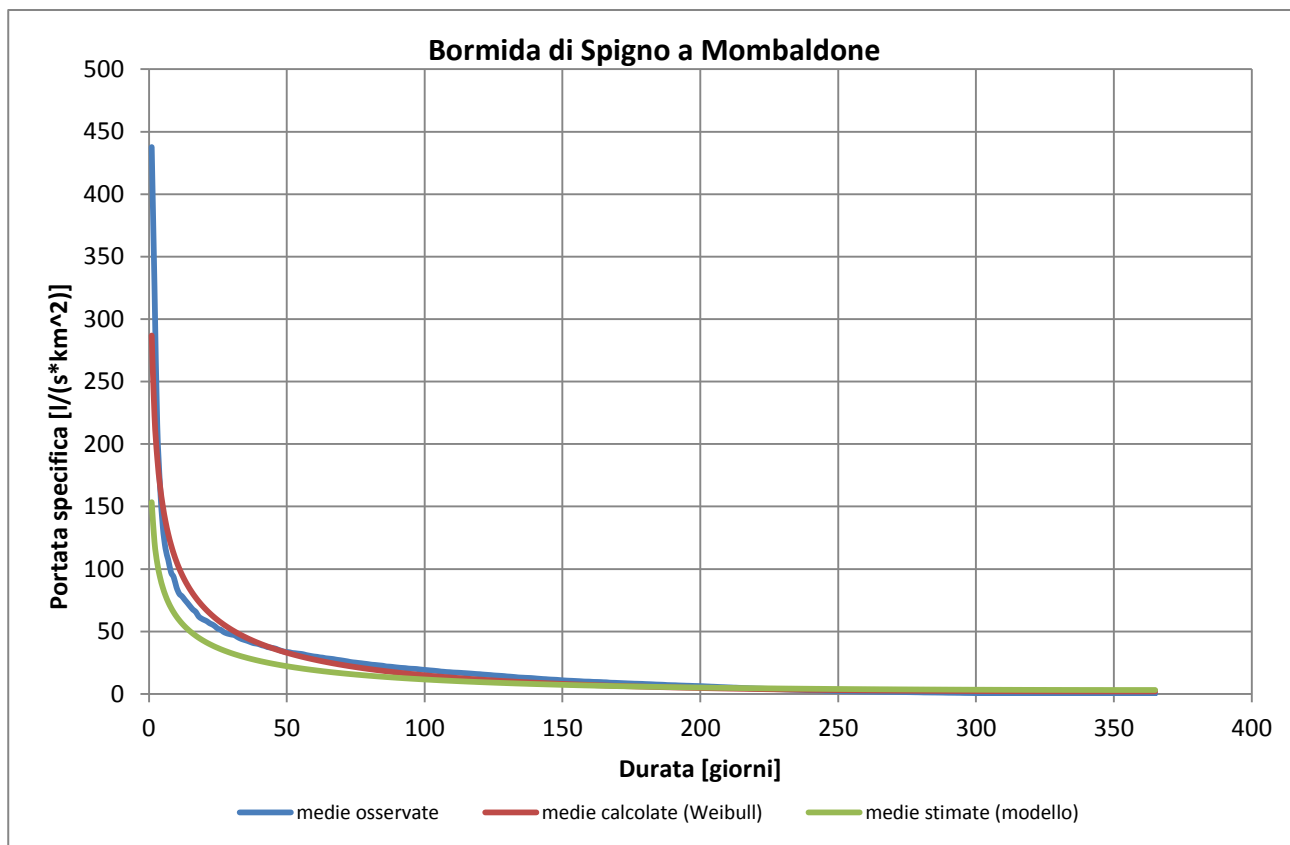


Fig.30 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata della Bormida di Spigno a Monbaldone

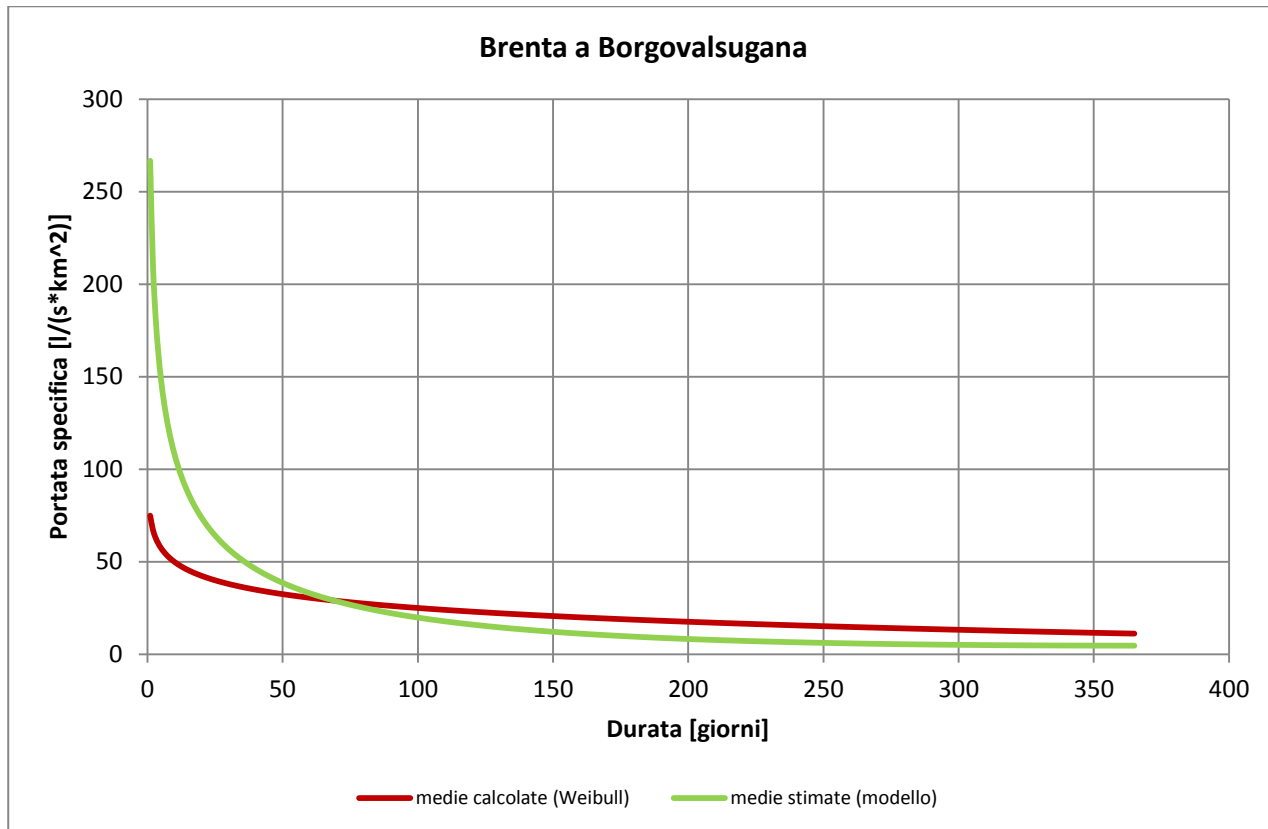


Fig. 31 Curva di durata media calcolata e stimata del Brenta a Borgovalsugana

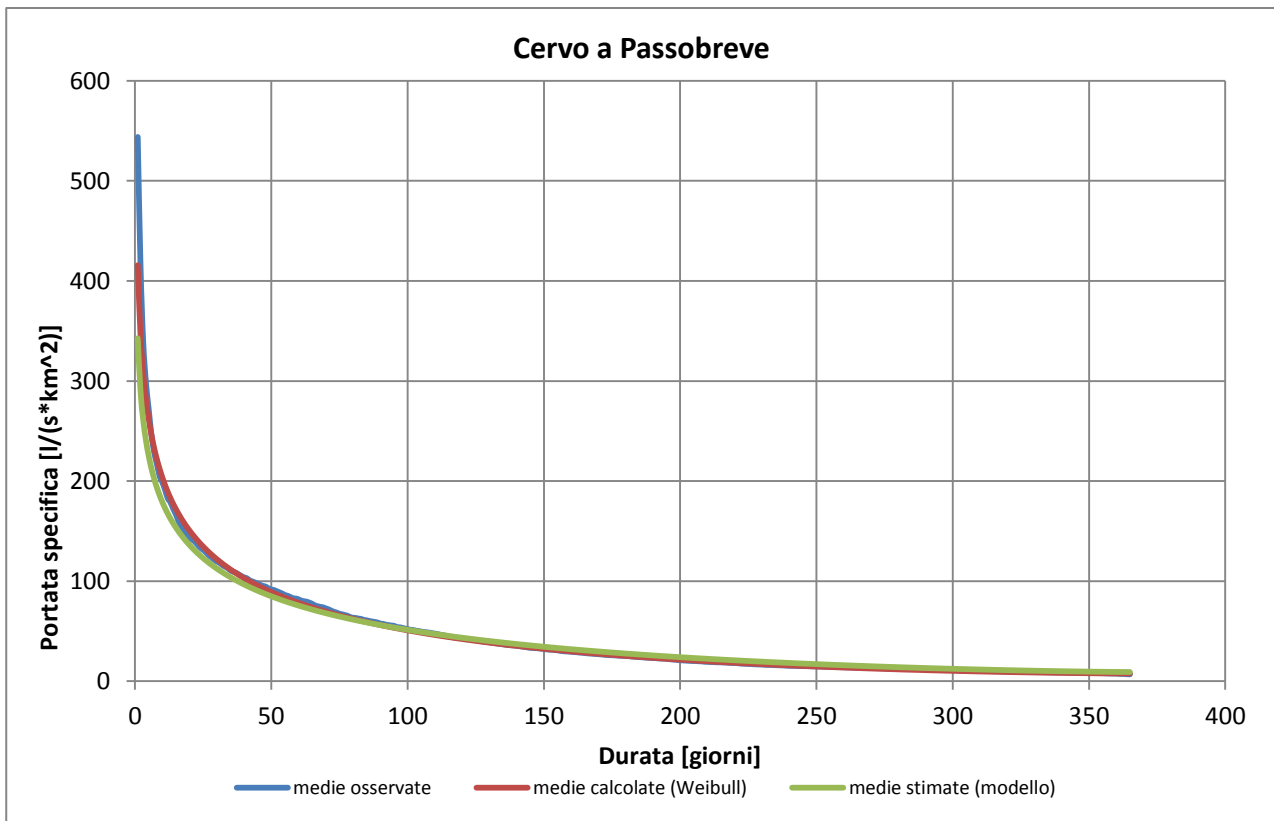


Fig. 32 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Cervo a Passobreve

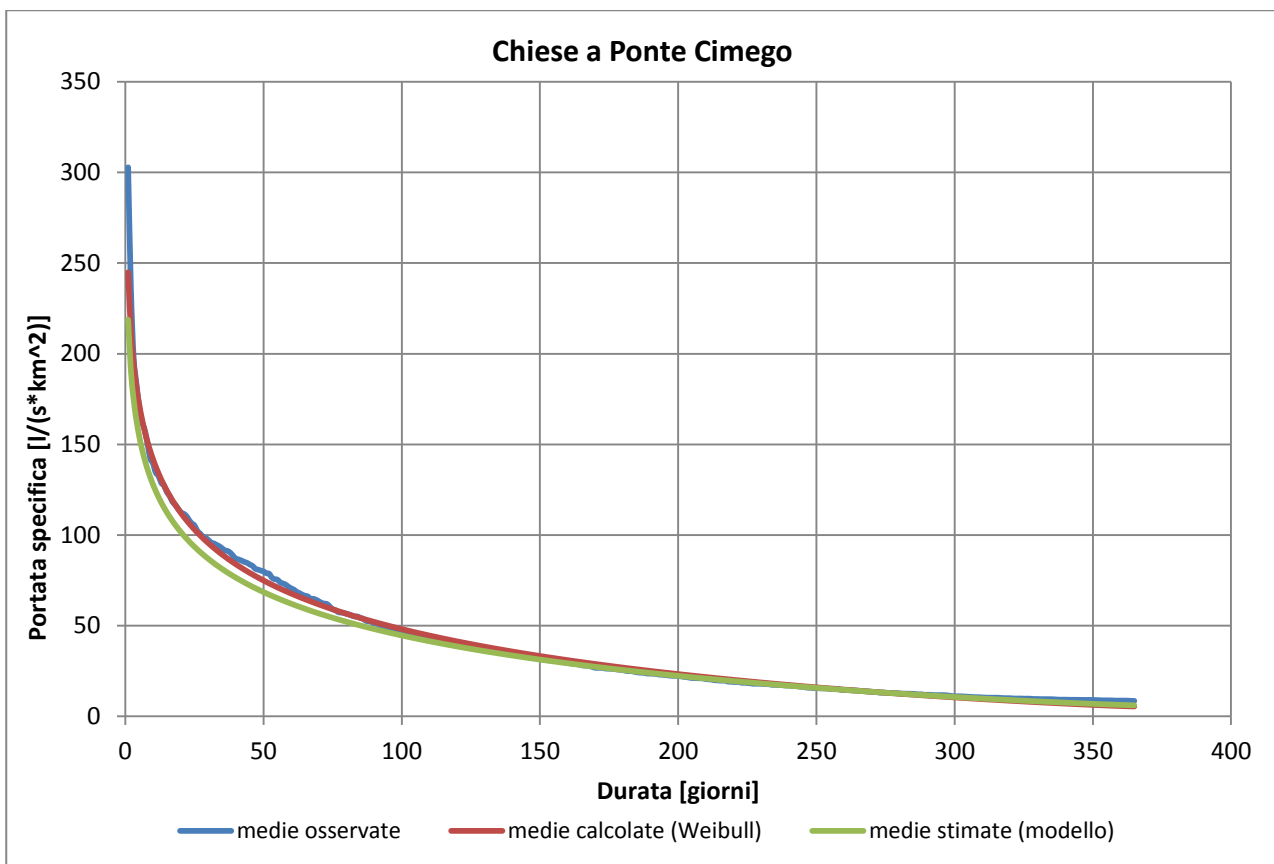


Fig. 33 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Chiese a Ponte Cimego

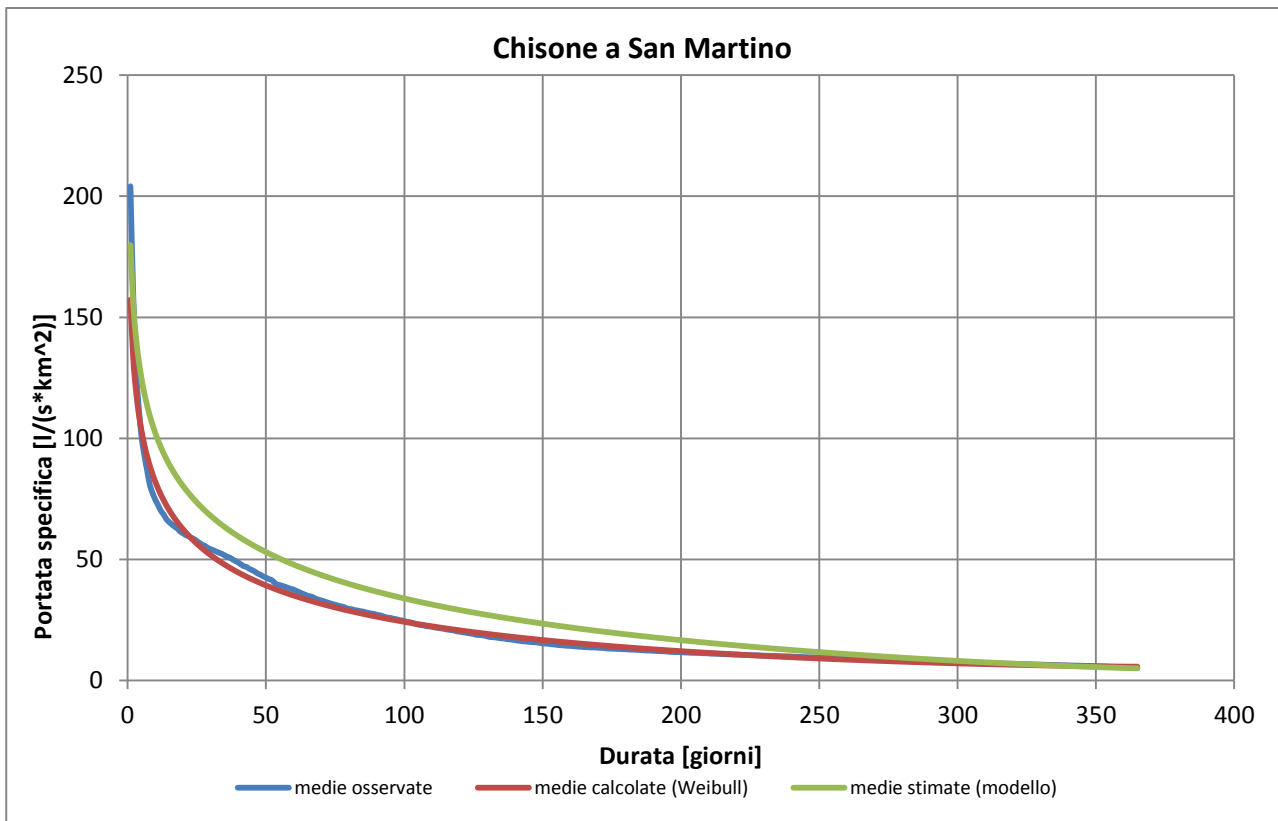


Fig. 34 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Chisone a San Martino

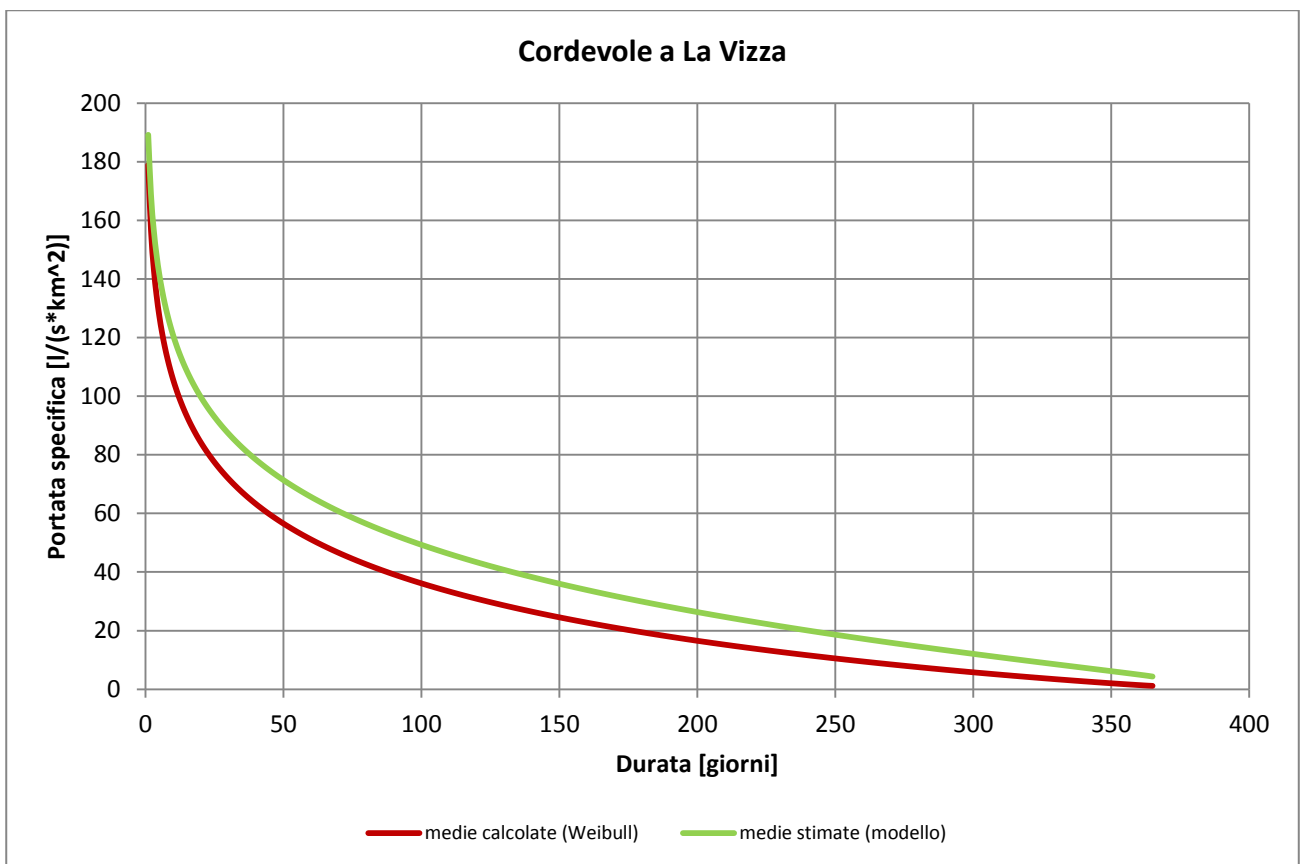


Fig. 35 Curva di durata media calcolata e stimata del Cordevole a La Vizza

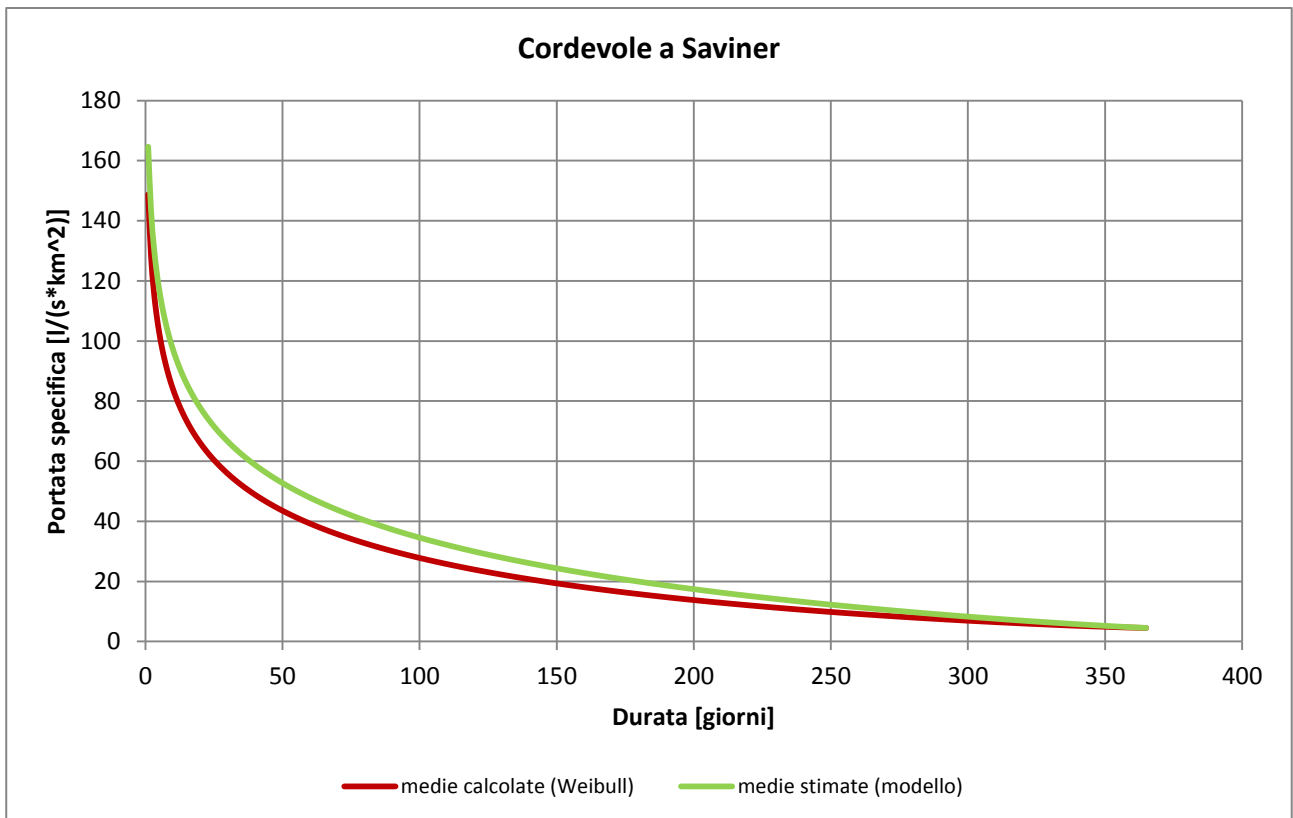


Fig. 36 Curva di durata media calcolata e stimata del Cordevole a Saviner

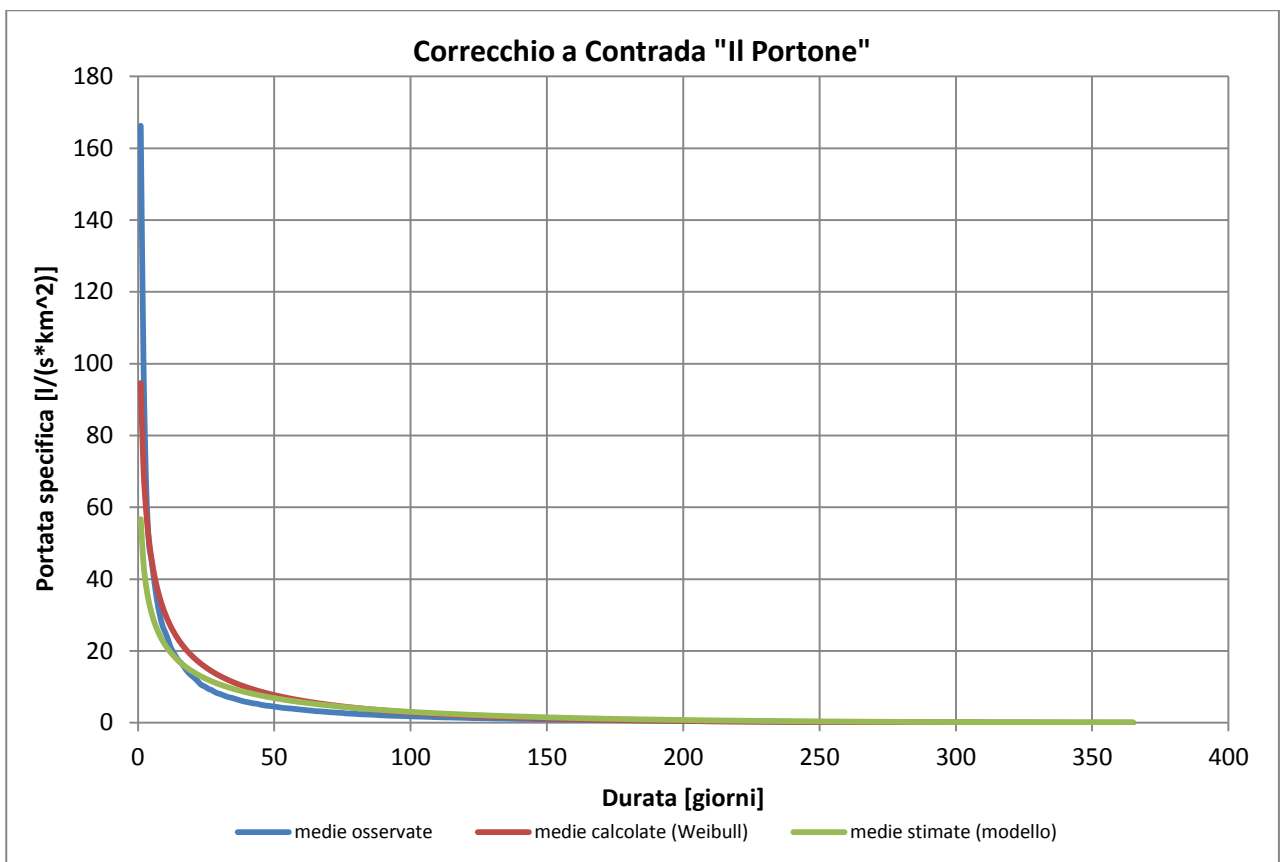


Fig. 37 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Correcchio a Contrada "Il Portone"

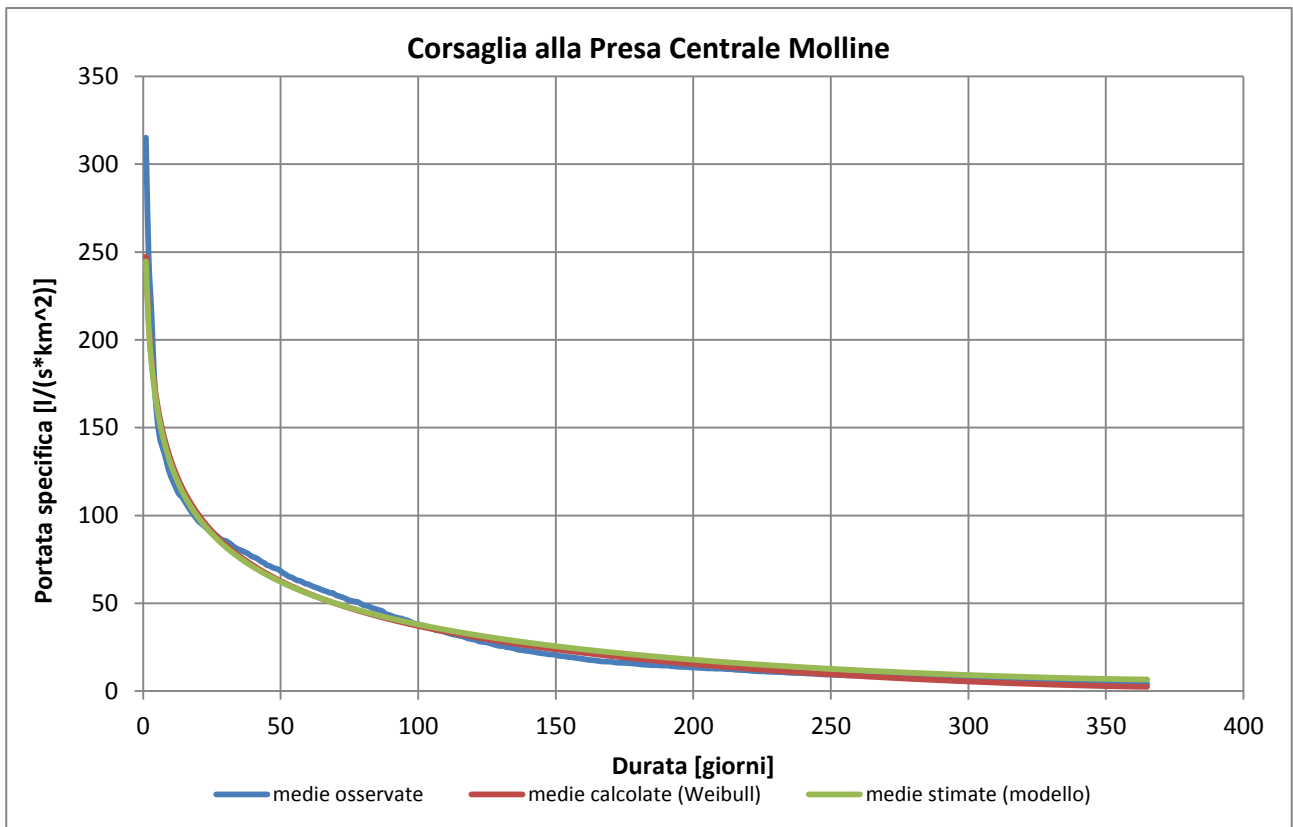


Fig. 38 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Corsaglia alla Presa Centrale Moline

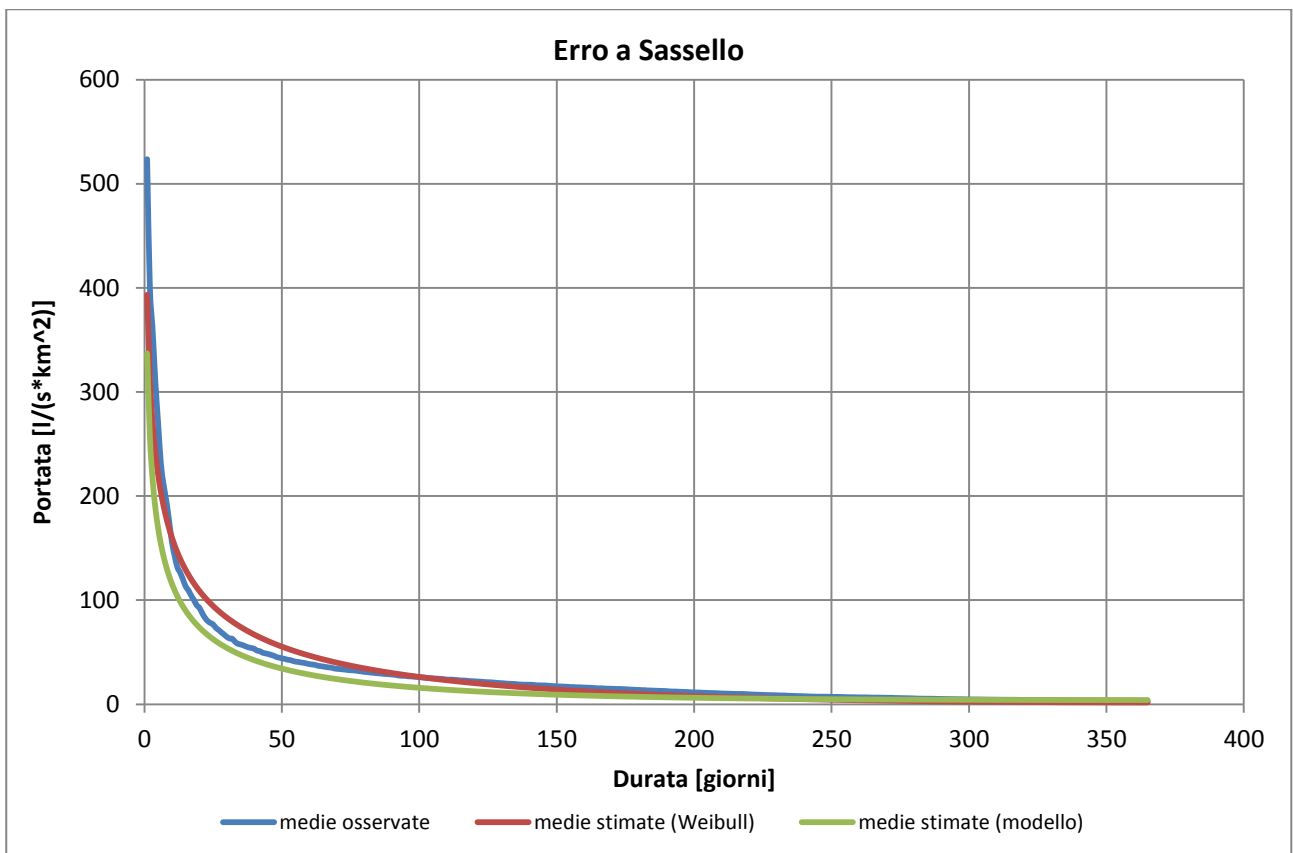


Fig. 39 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata dell'Erro a Sassello

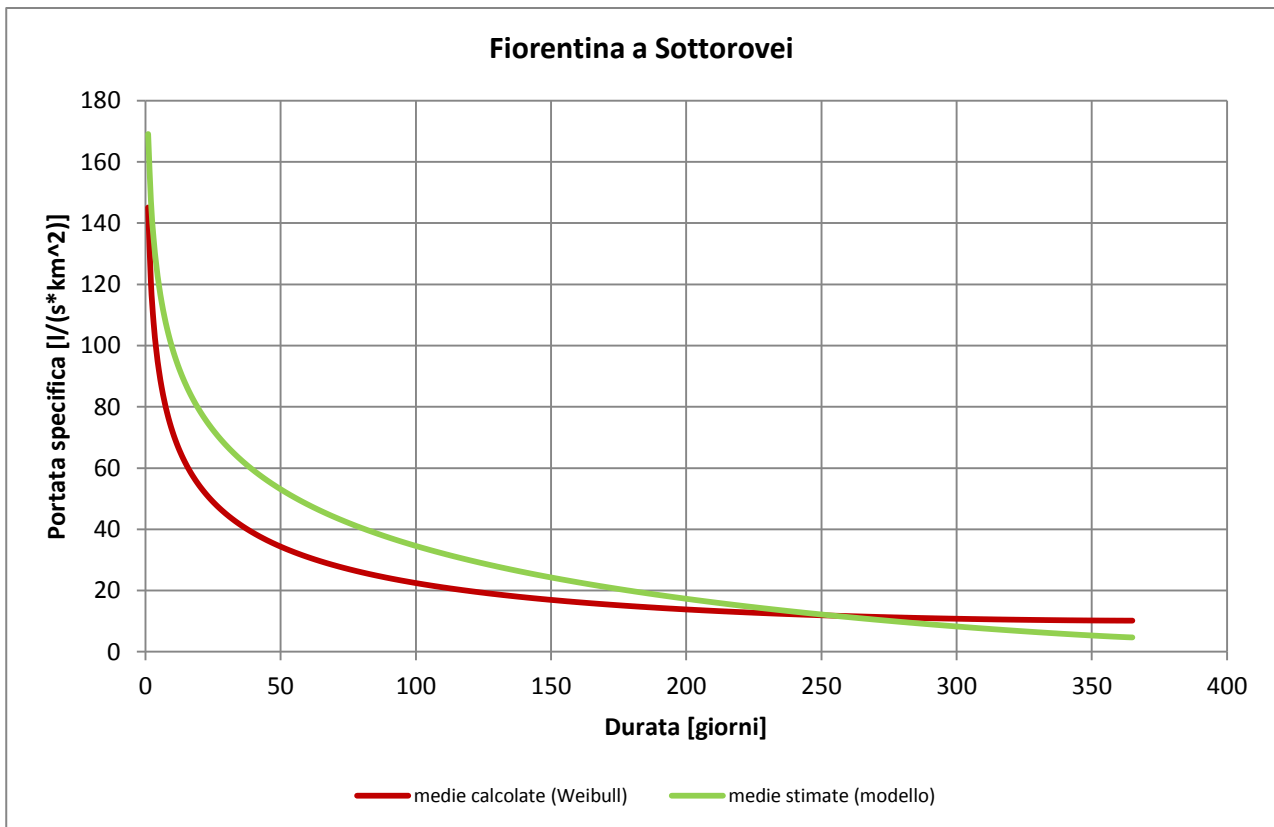


Fig. 40 Curva di durata media calcolata e stimata del Fiorentina a Sottorovei

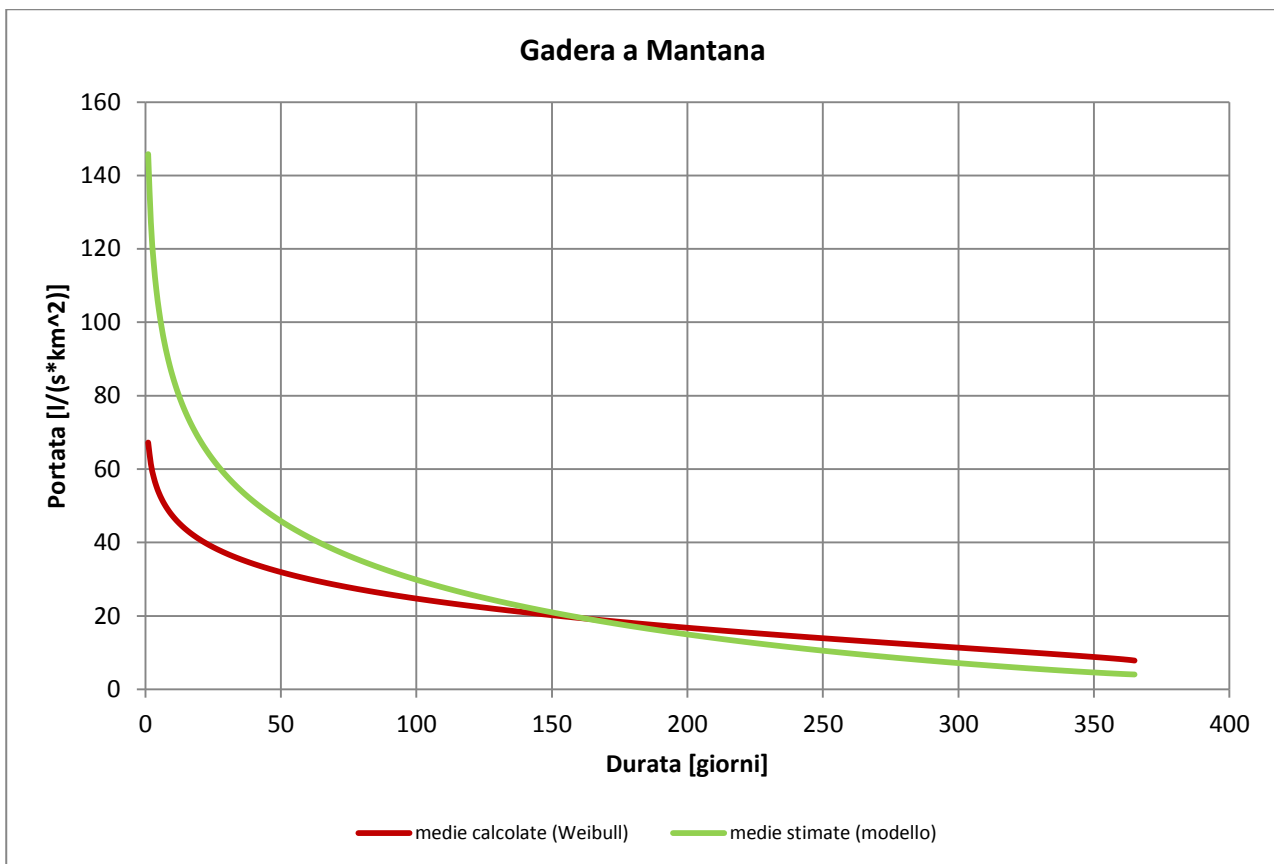


Fig. 41 Curva di durata media calcolata e stimata del Gadera a Mantana

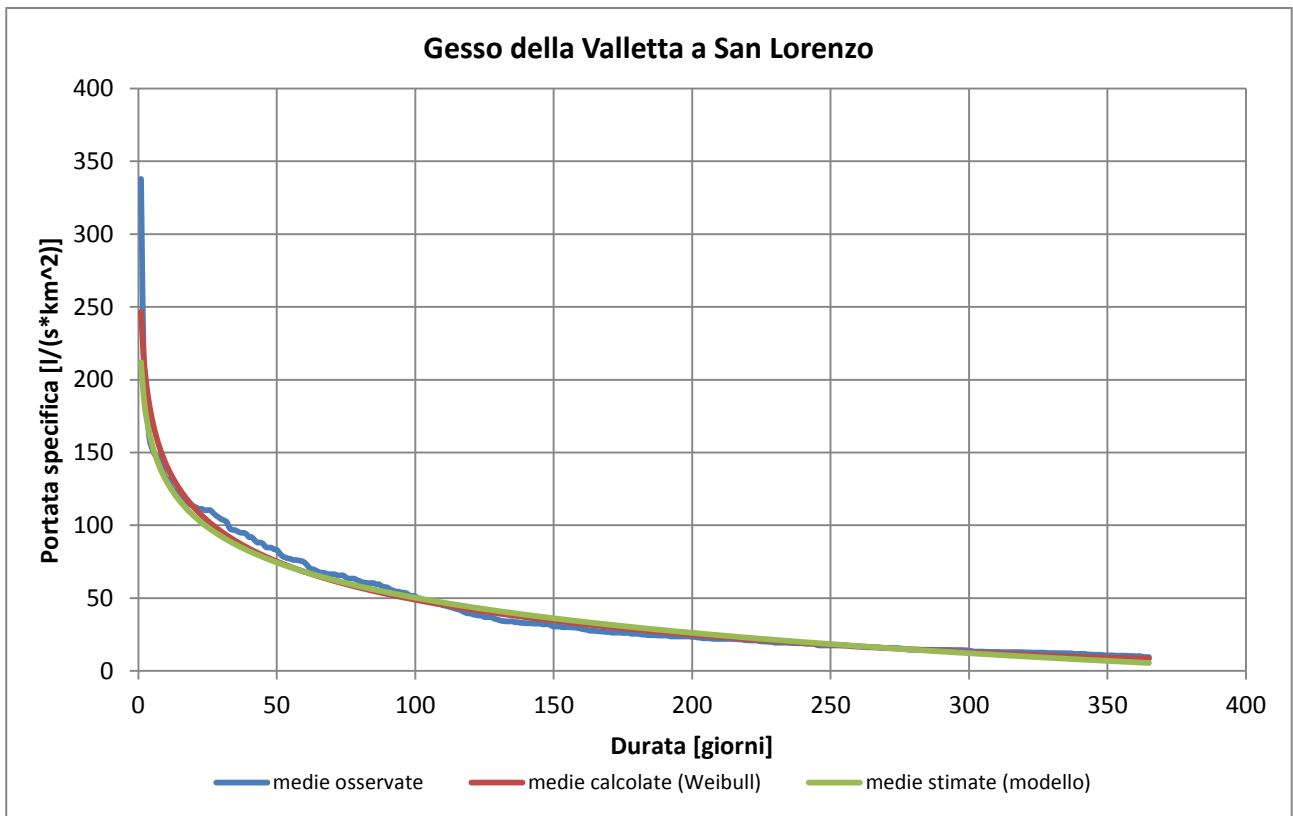


Fig. 42 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Gesso della Valletta a San Lorenzo

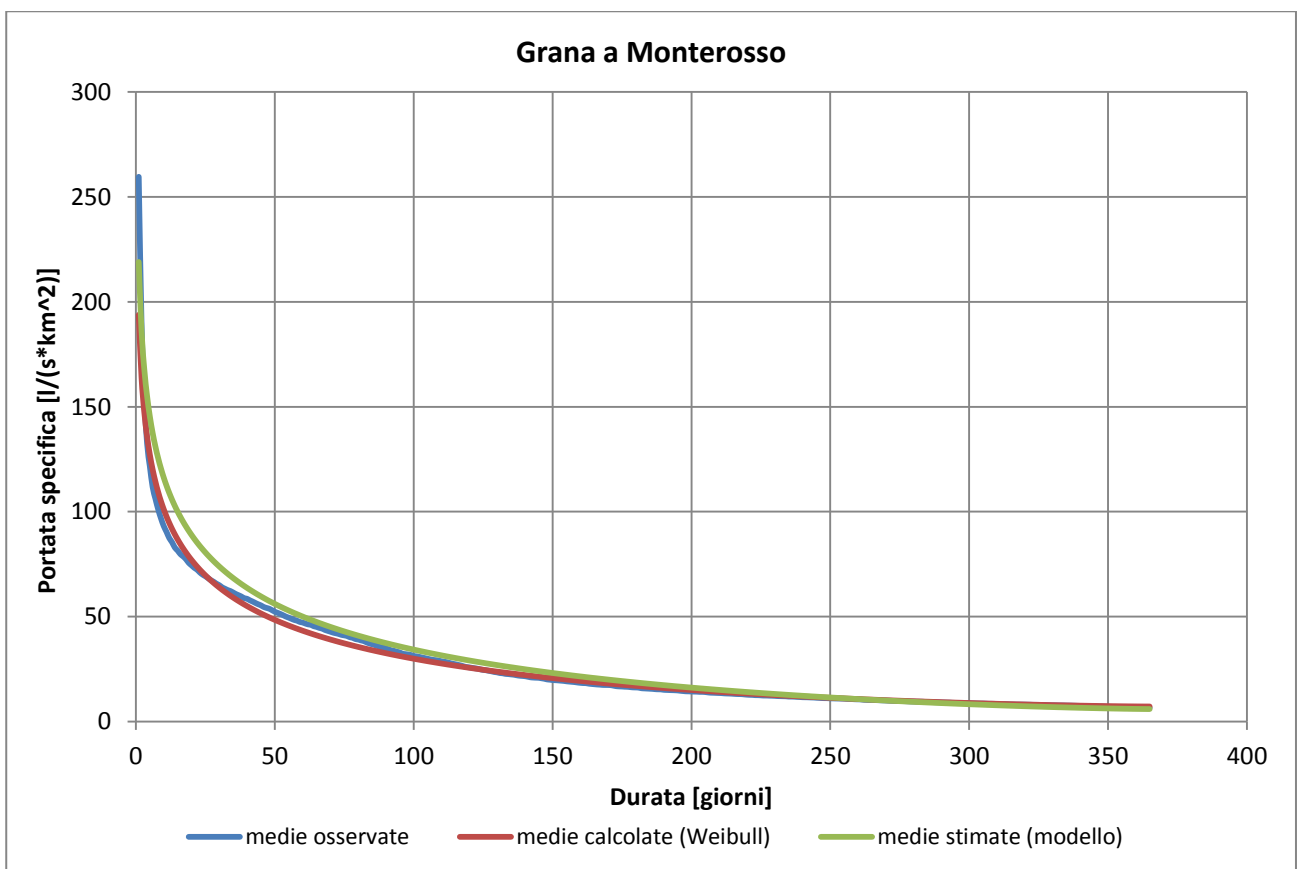


Fig. 43 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Grana a Monterosso

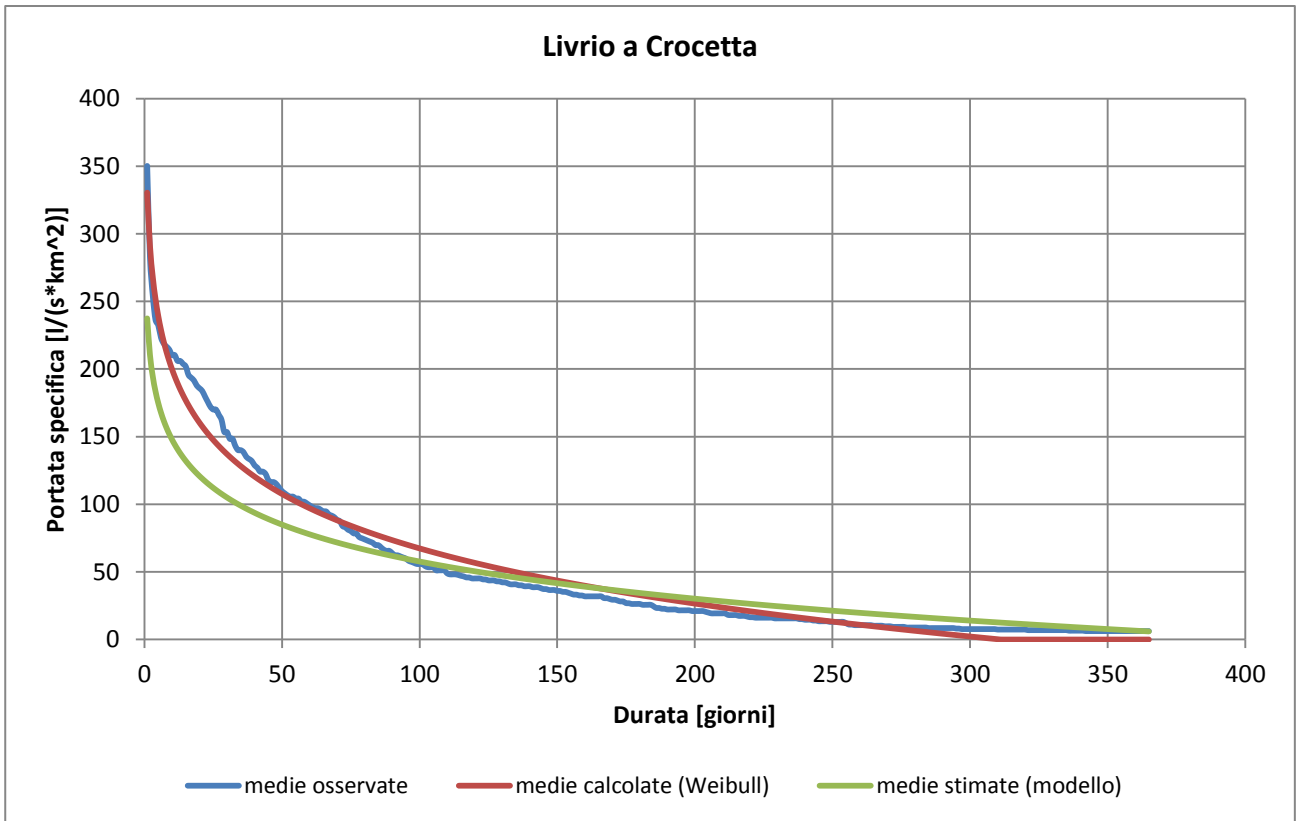


Fig. 44 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Livrio a Crocetta

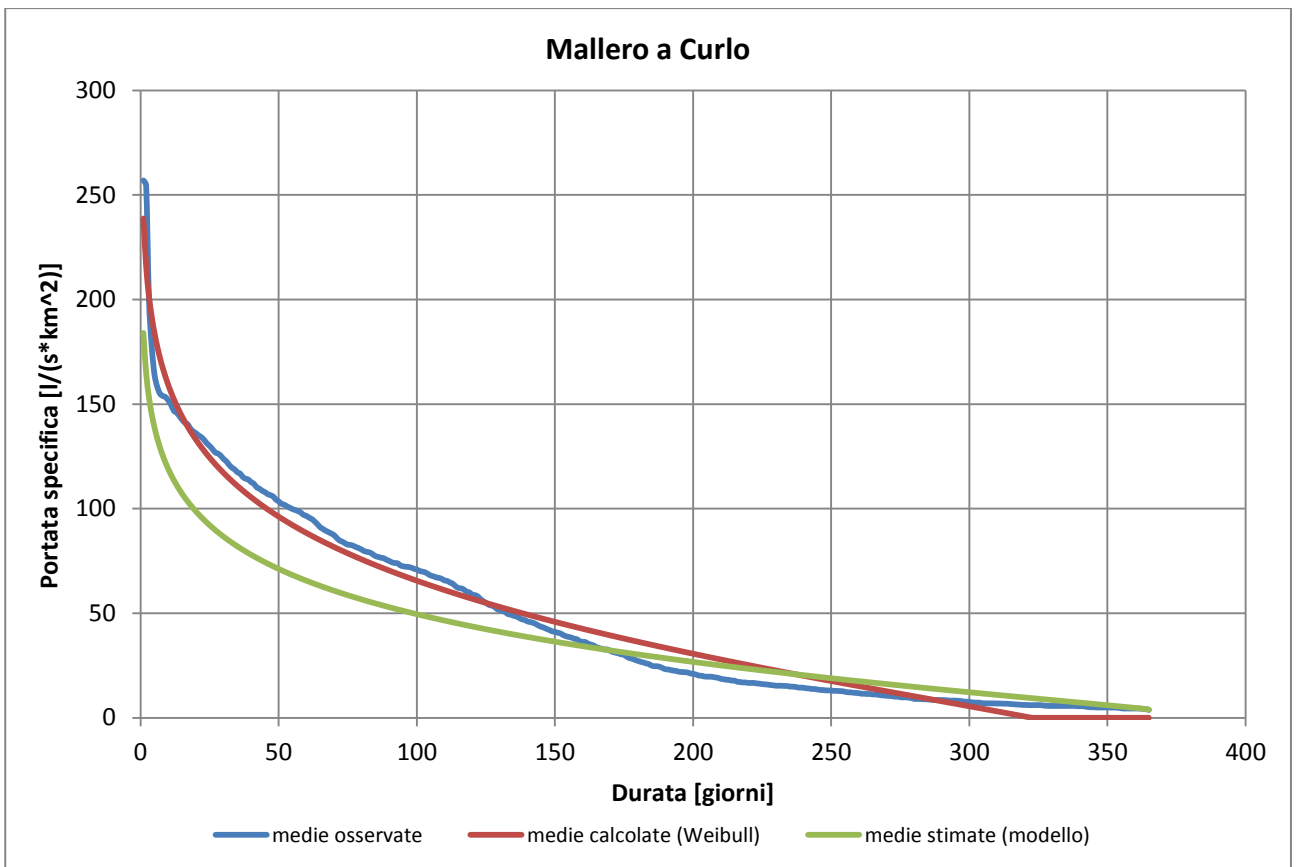


Fig. 45 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Mallero a Curlo

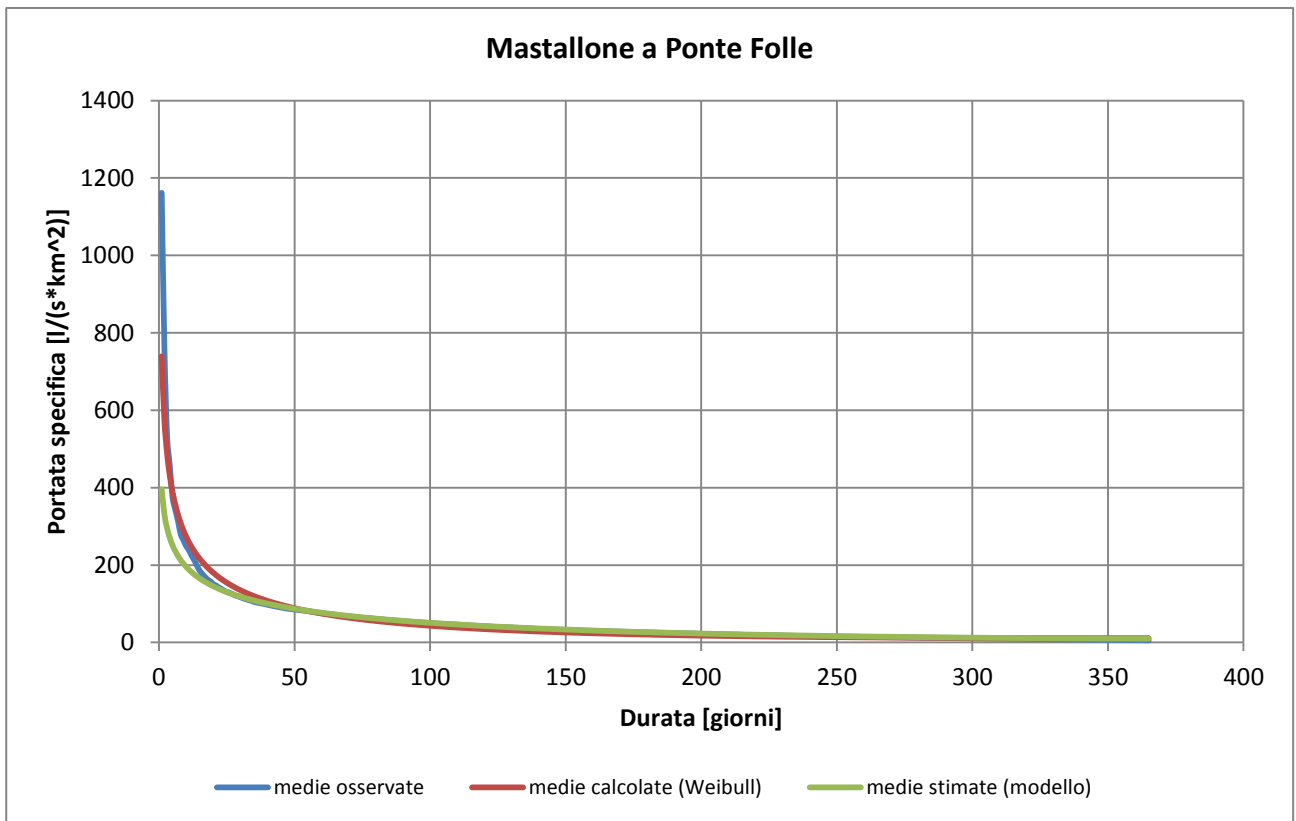


Fig. 46 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Mastallone a Ponte Folle

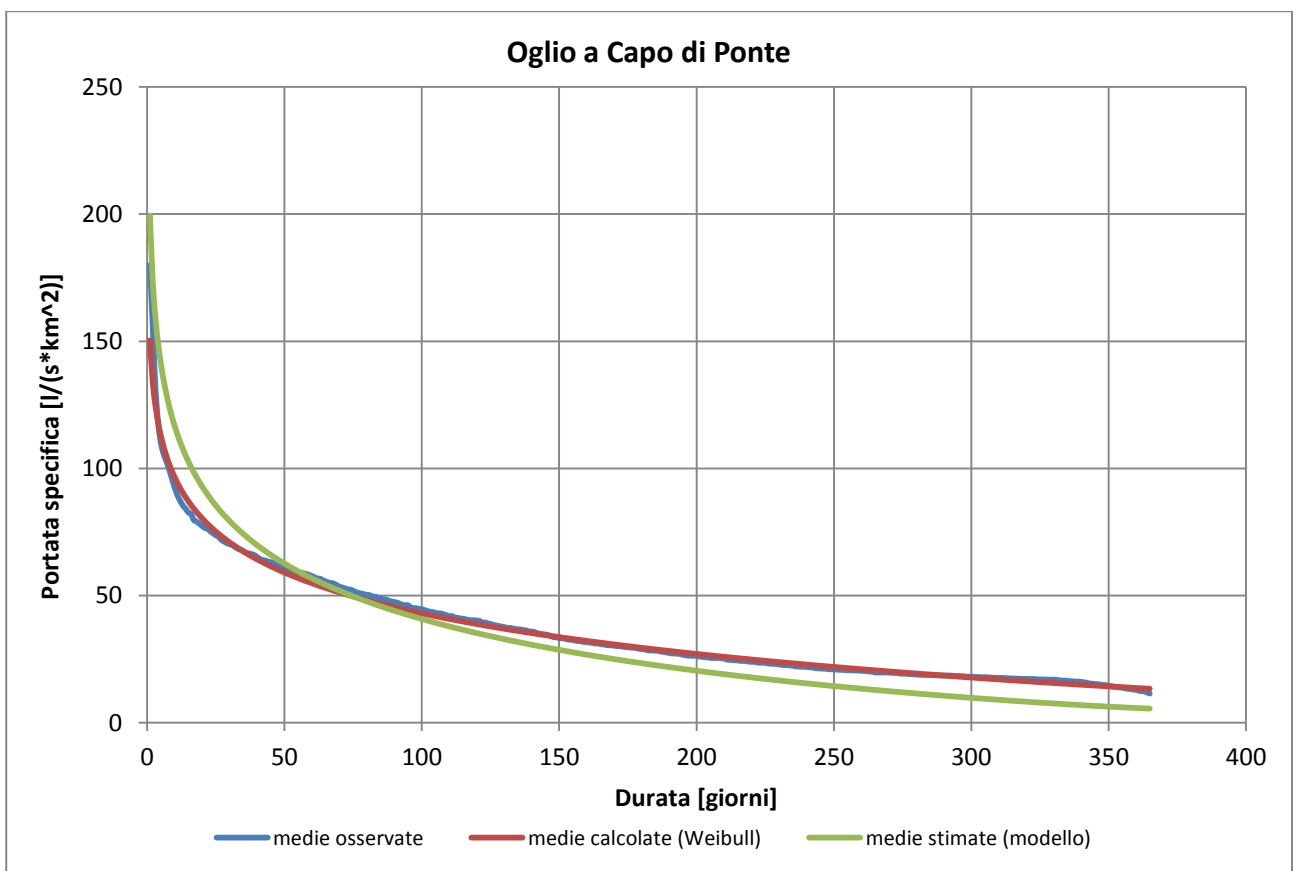


Fig. 47 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata dell'Oglio a Capo di Ponte

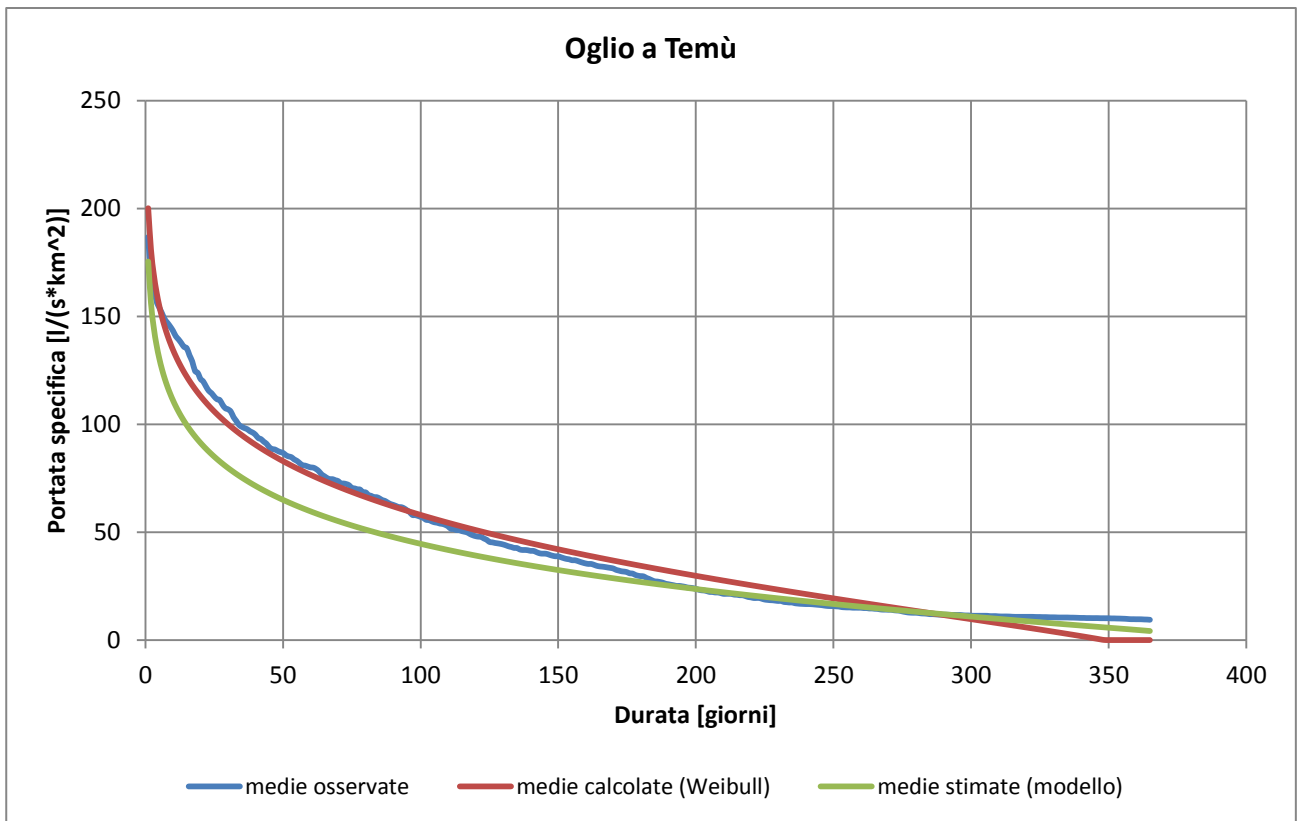


Fig. 48 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata dell'Oglio a Temù

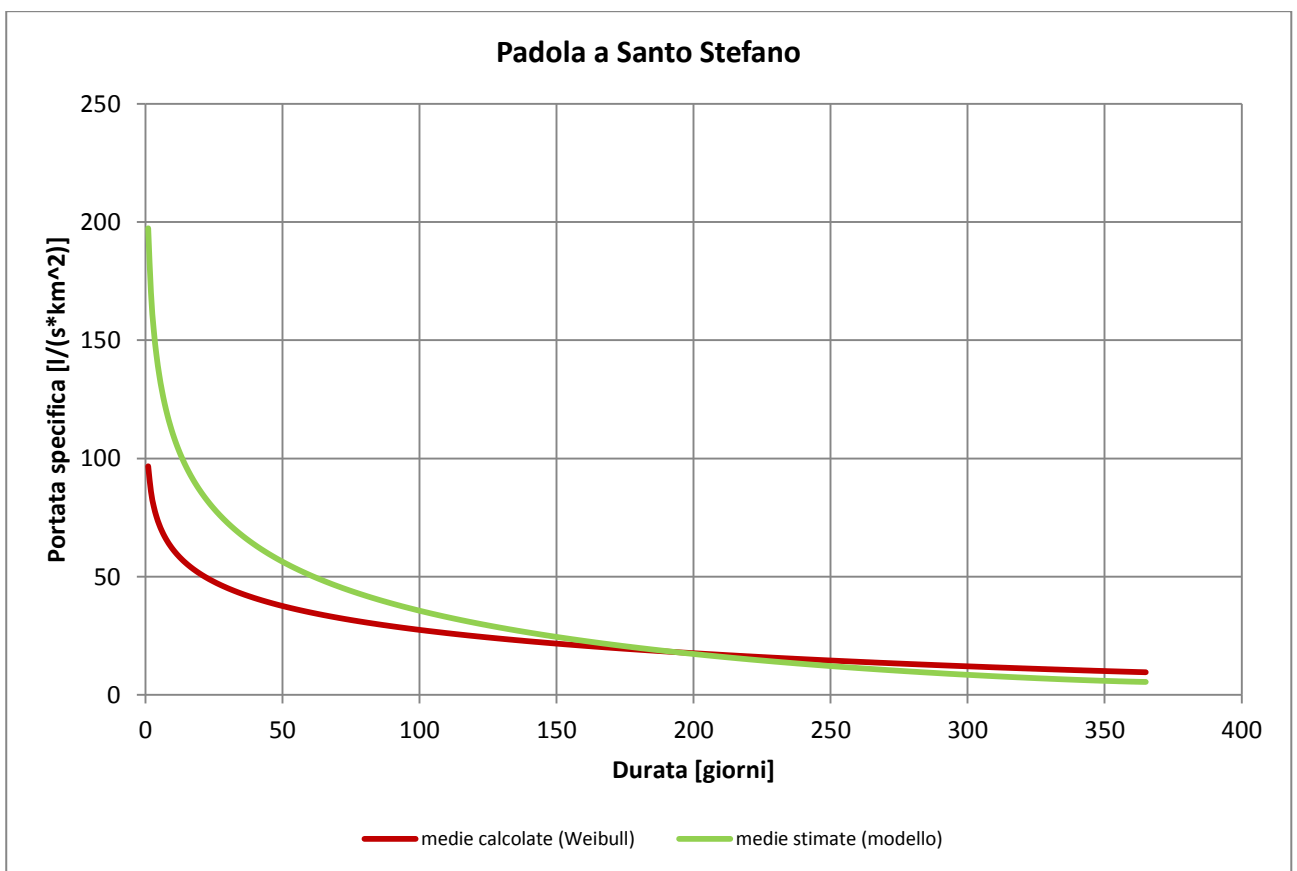


Fig. 49 Curva di durata media calcolata e stimata del Padola a Santo Stefano

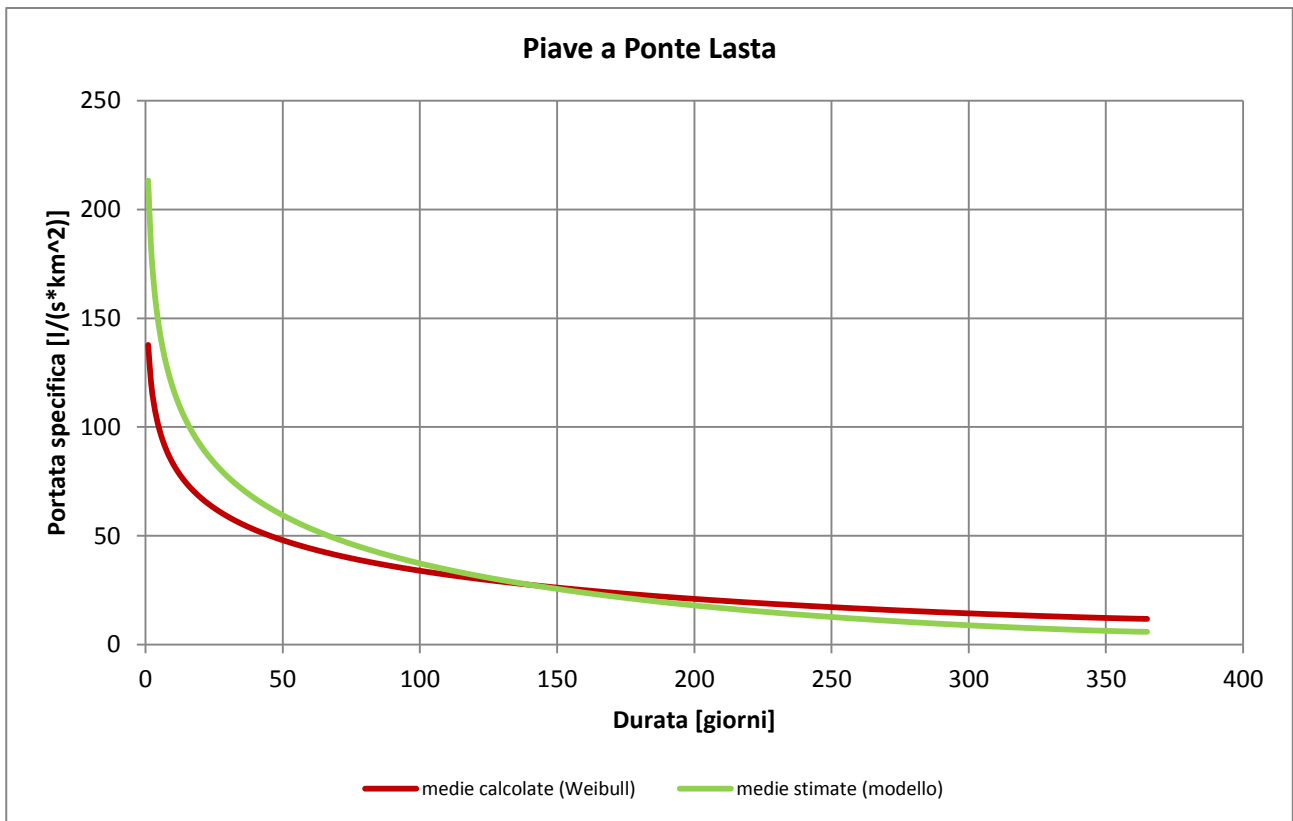


Fig. 50 Curva di durata media calcolata e stimata del Piave a Ponte Lasta

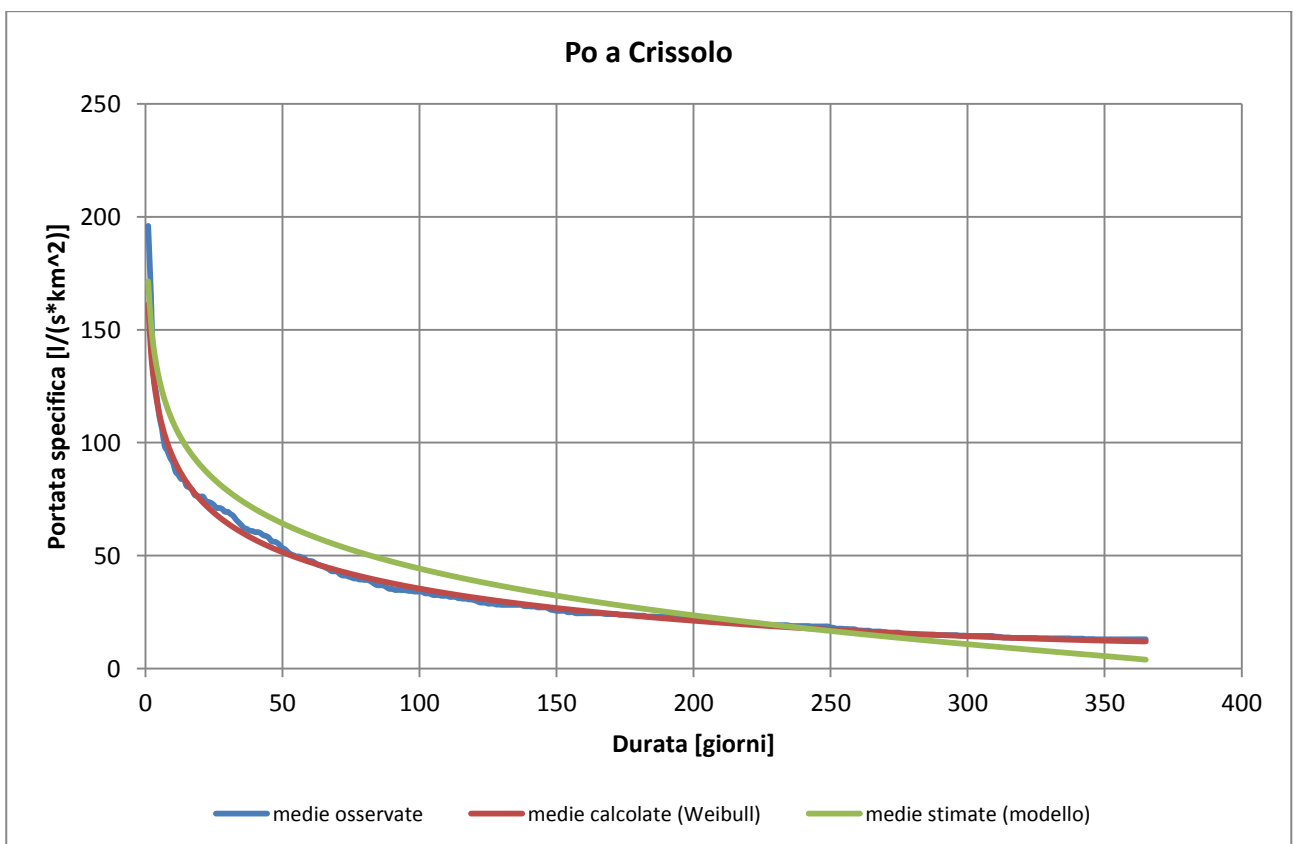


Fig. 51 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Po a Crissolo

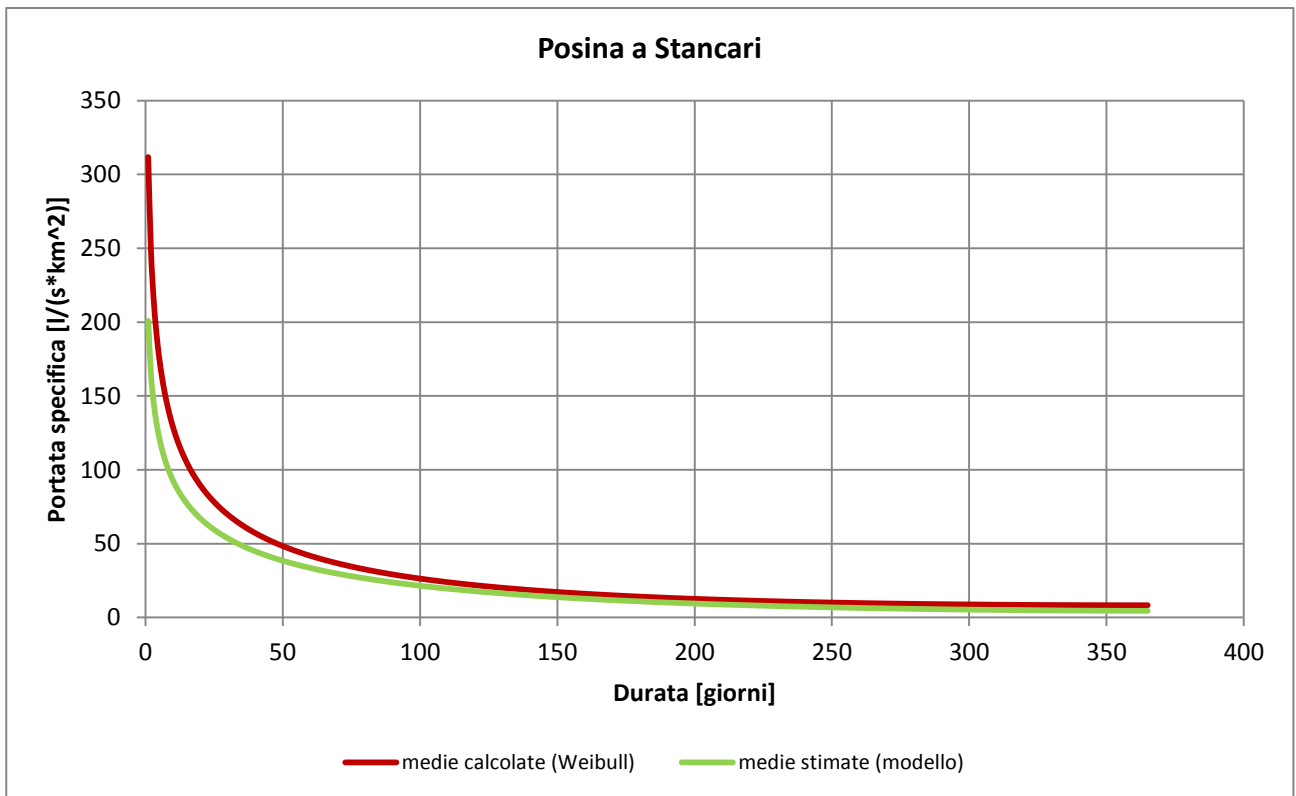


Fig. 52 Curva di durata media calcolata e stimata del Posina a Stancari

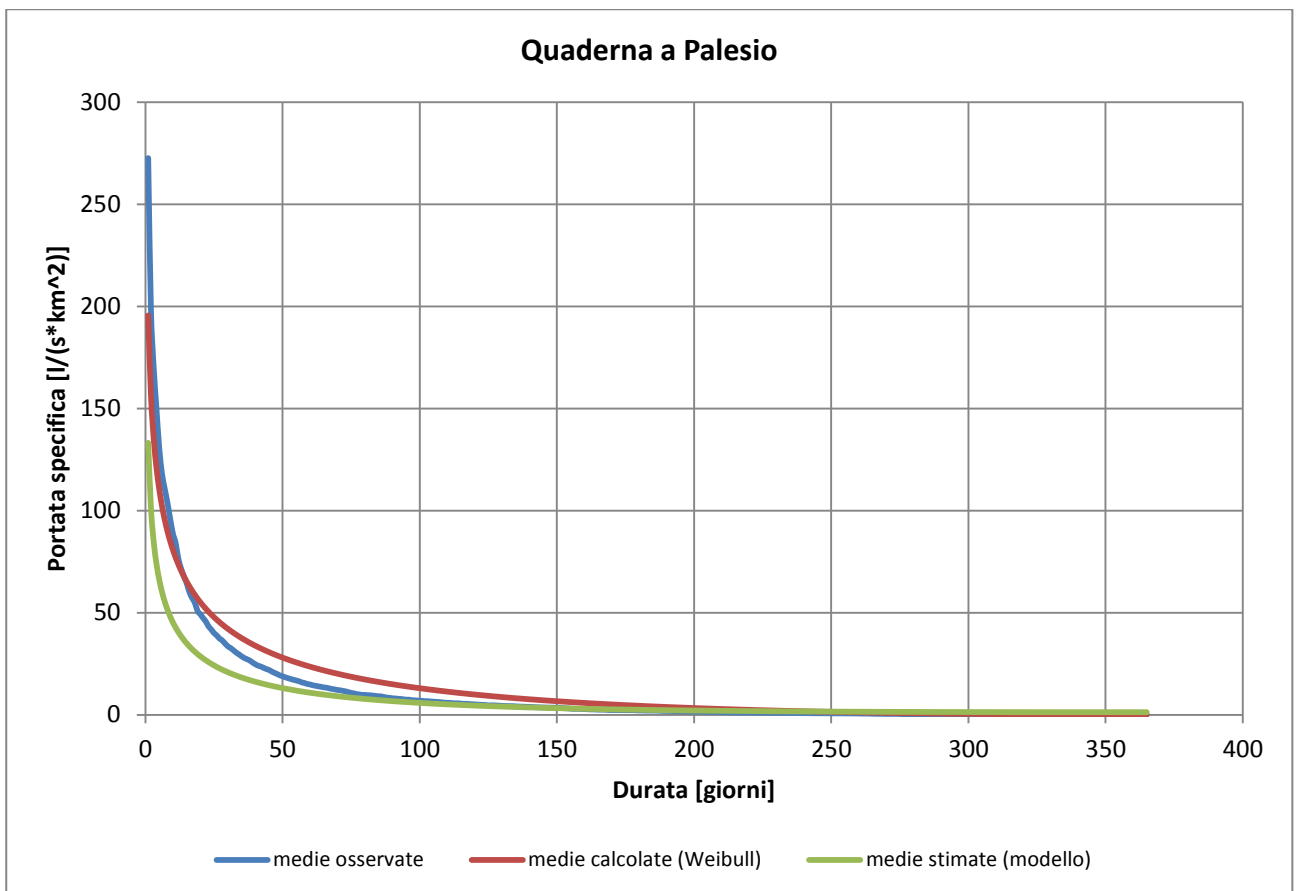


Fig. 53 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Quaderna a Palesio

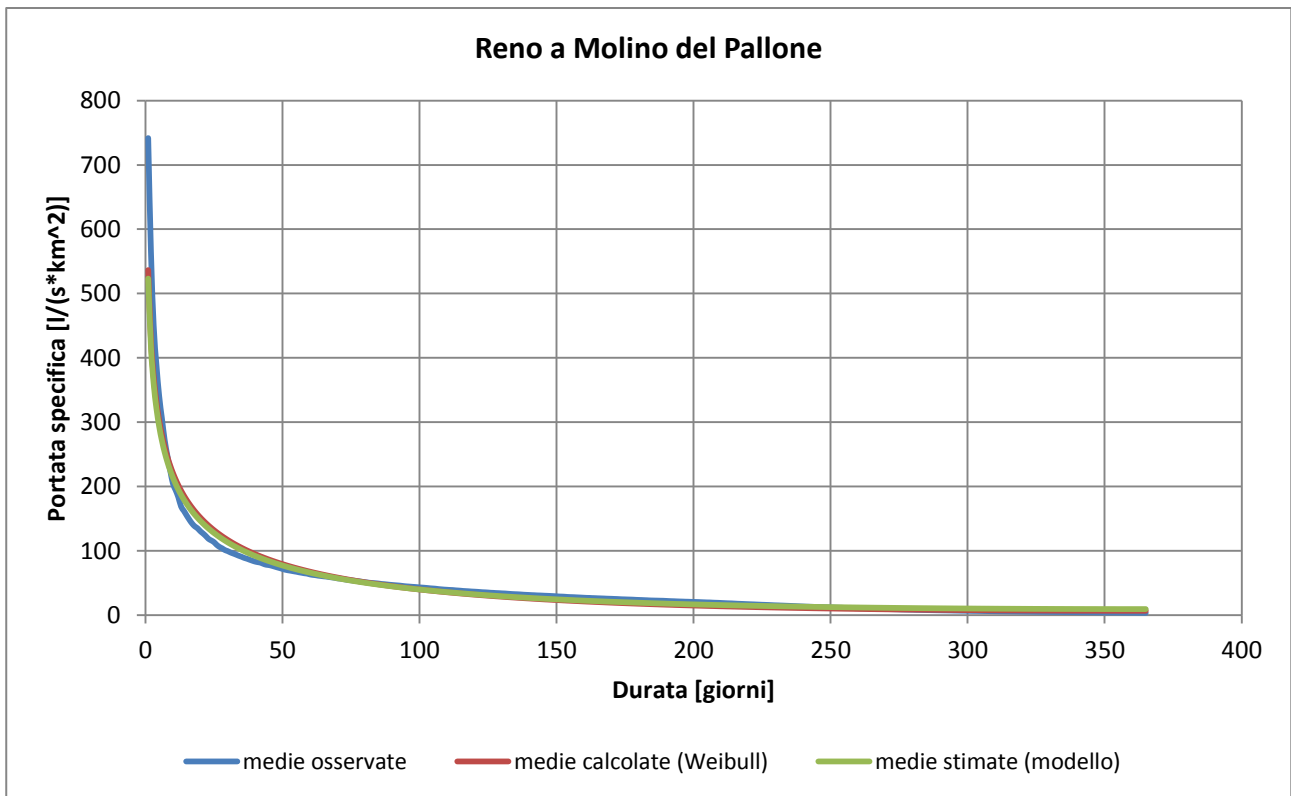


Fig. 54 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Reno a Molino del Pallone

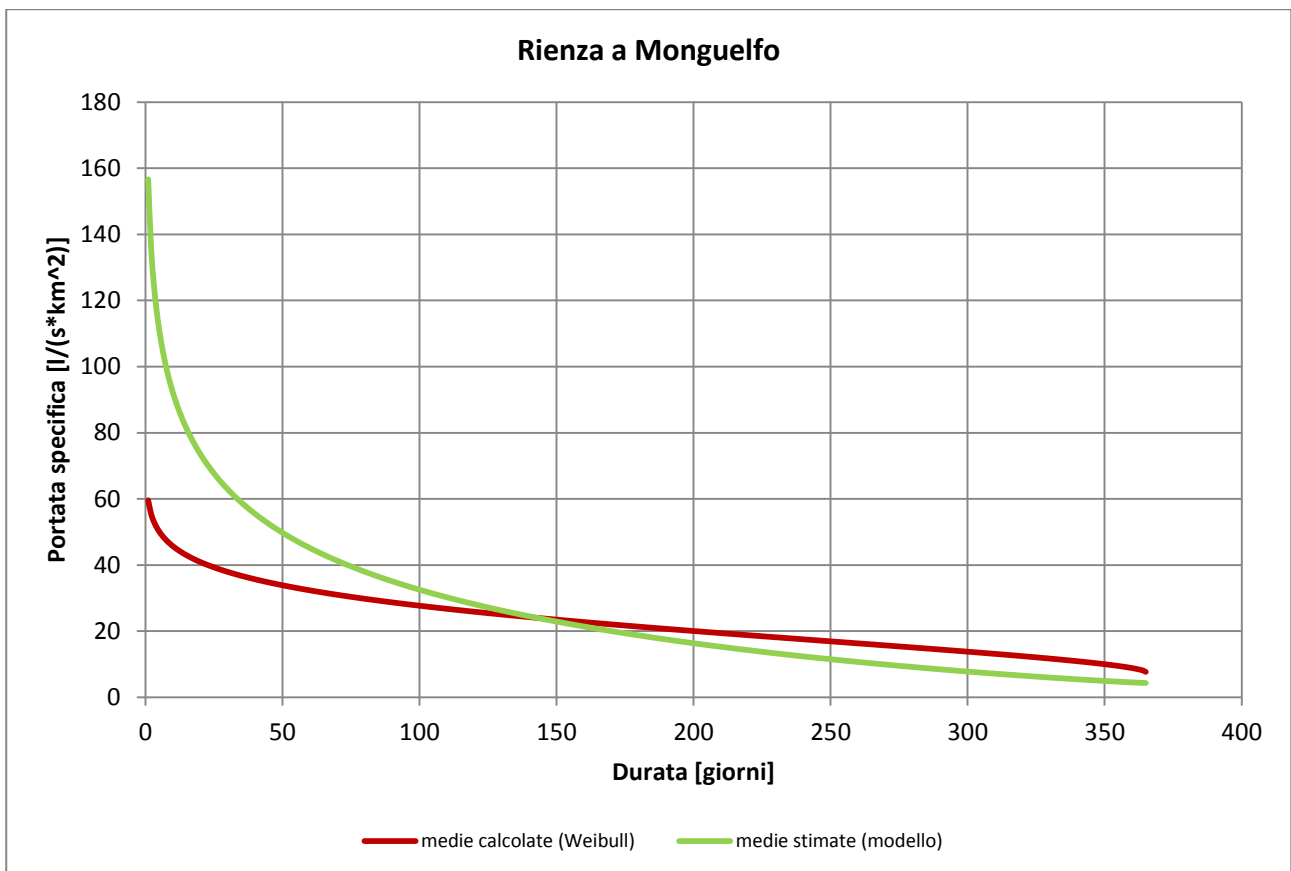


Fig. 55 Curva di durata media calcolata e stimata della Rienza a Monguelfo

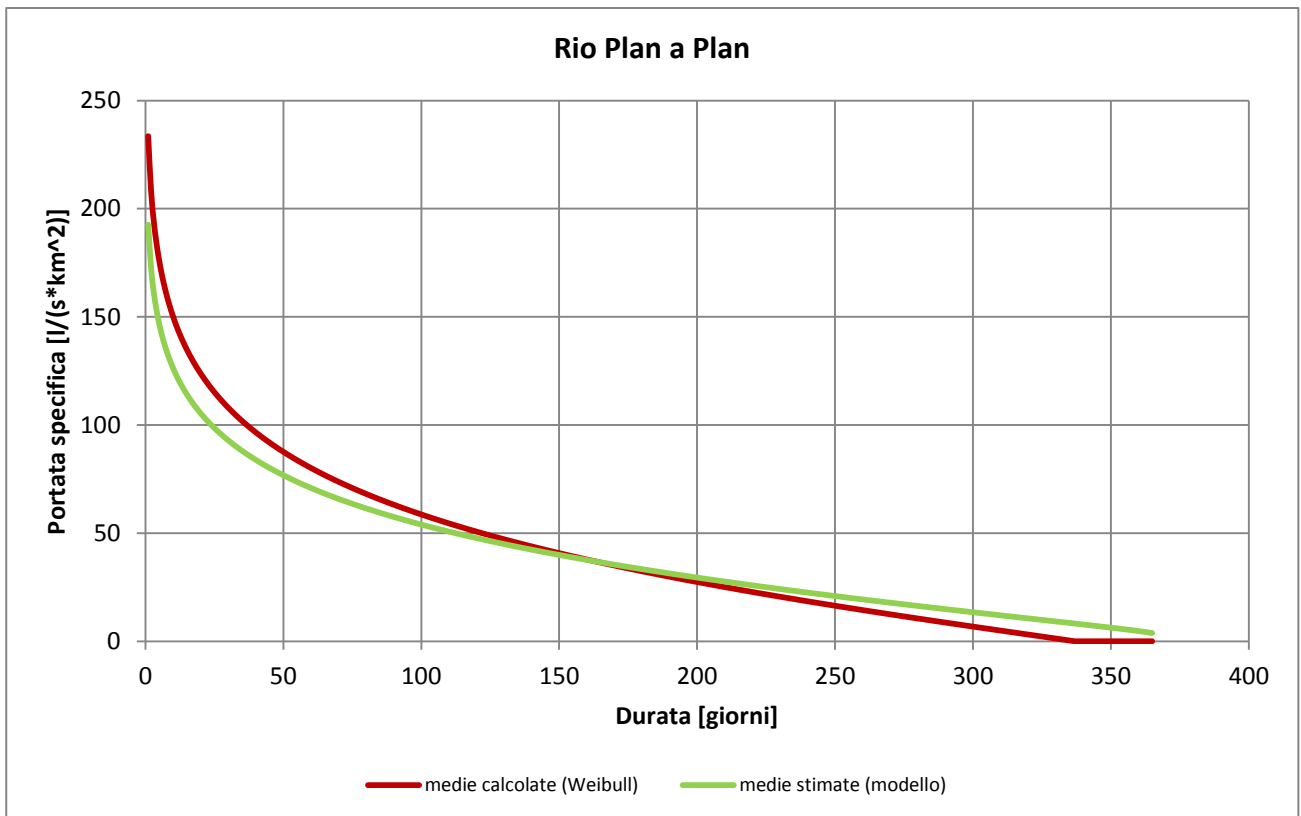


Fig. 56 Curva di durata media calcolata e stimata del Rio Plan a Plan

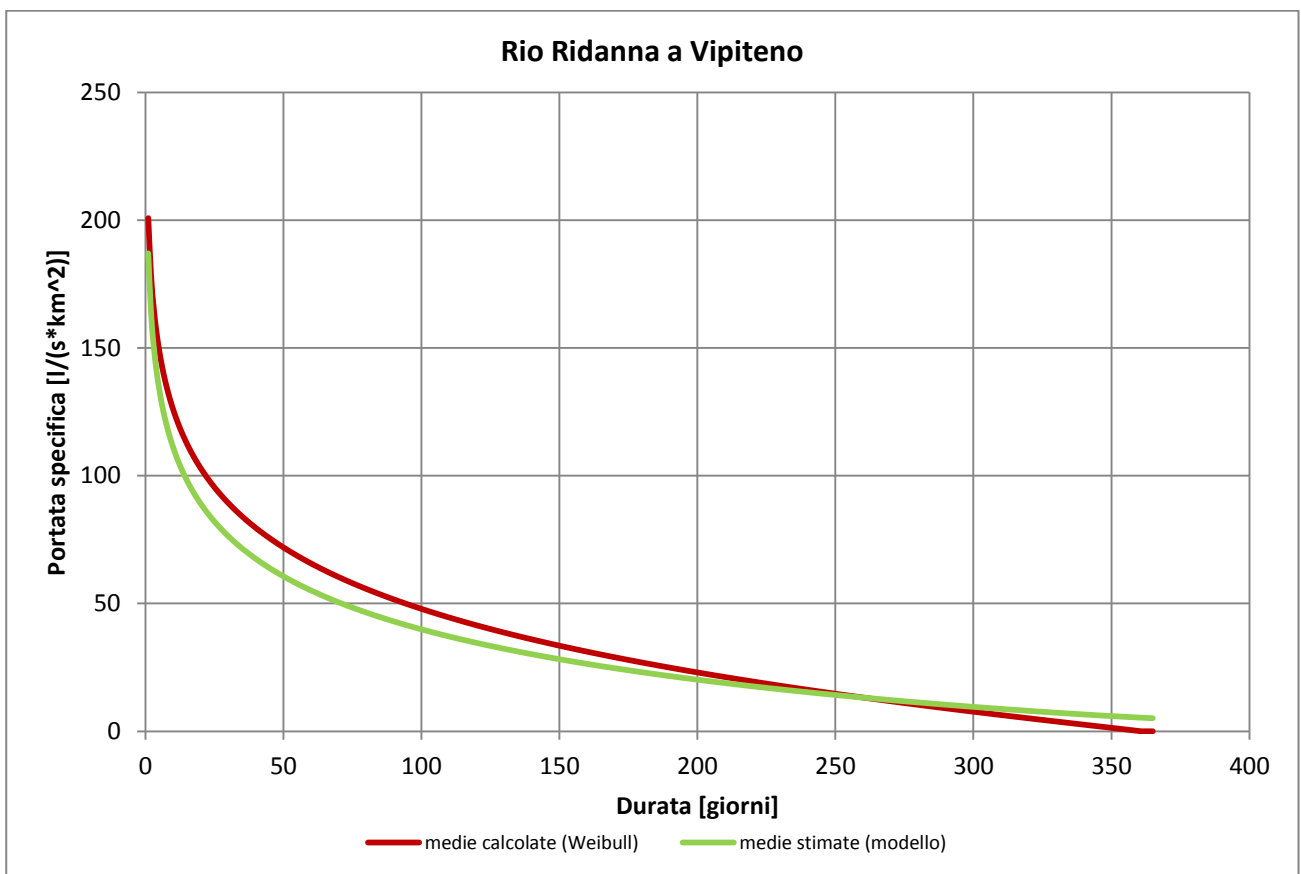


Fig. 57 Curva di durata media calcolata e stimata del Rio Ridanna a Vipiteno

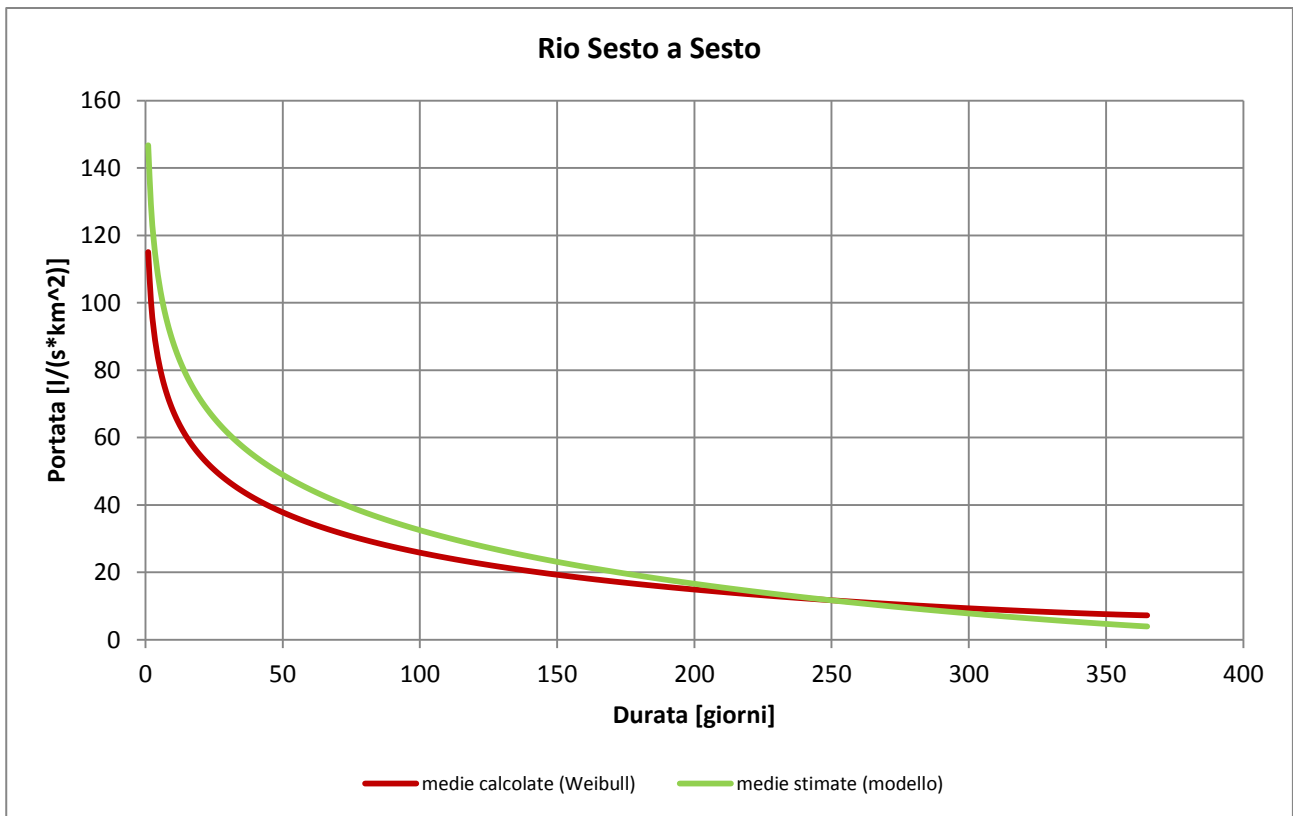


Fig. 58 Curva di durata media calcolata e stimata del Rio Sesto a Sesto

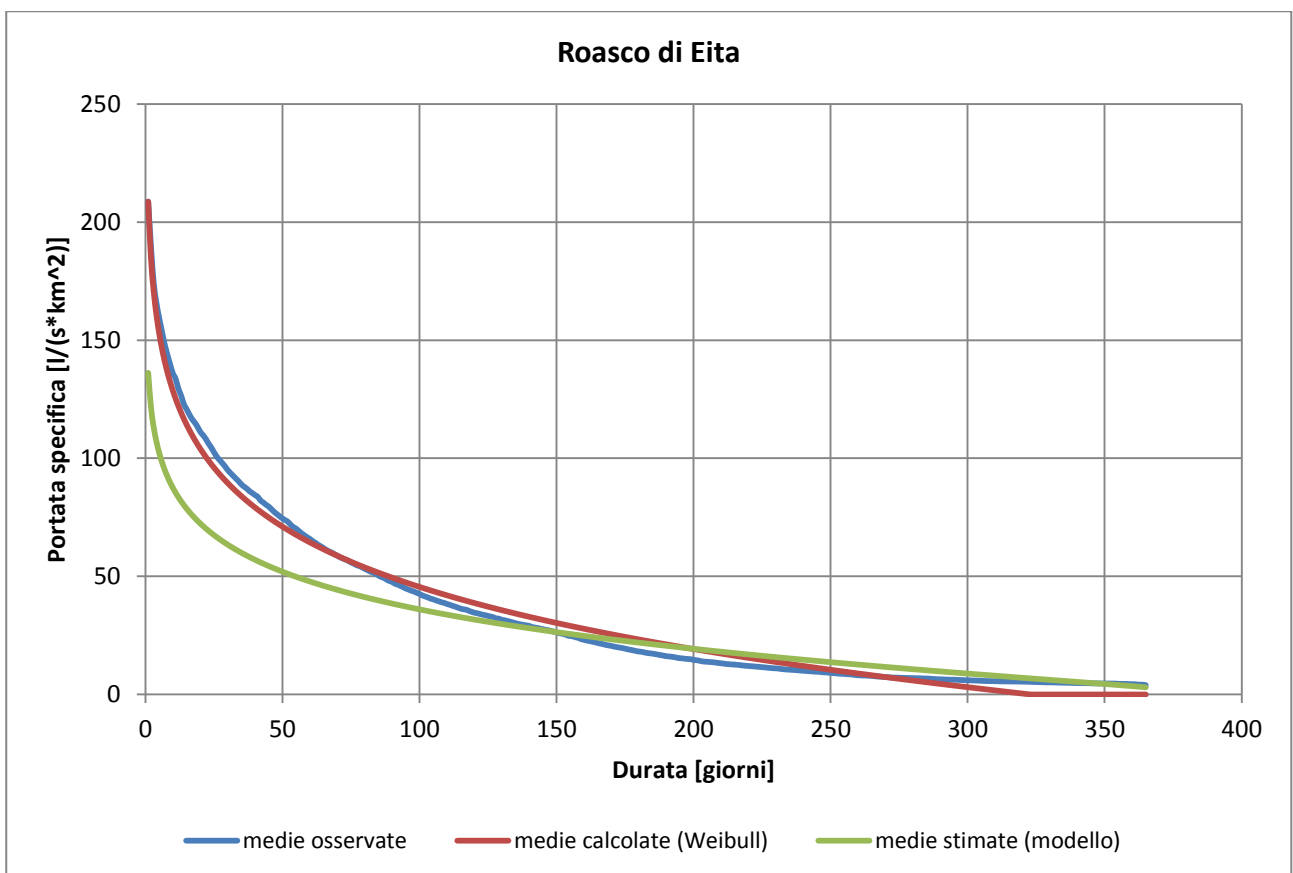


Fig. 59 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Roasco di Eita

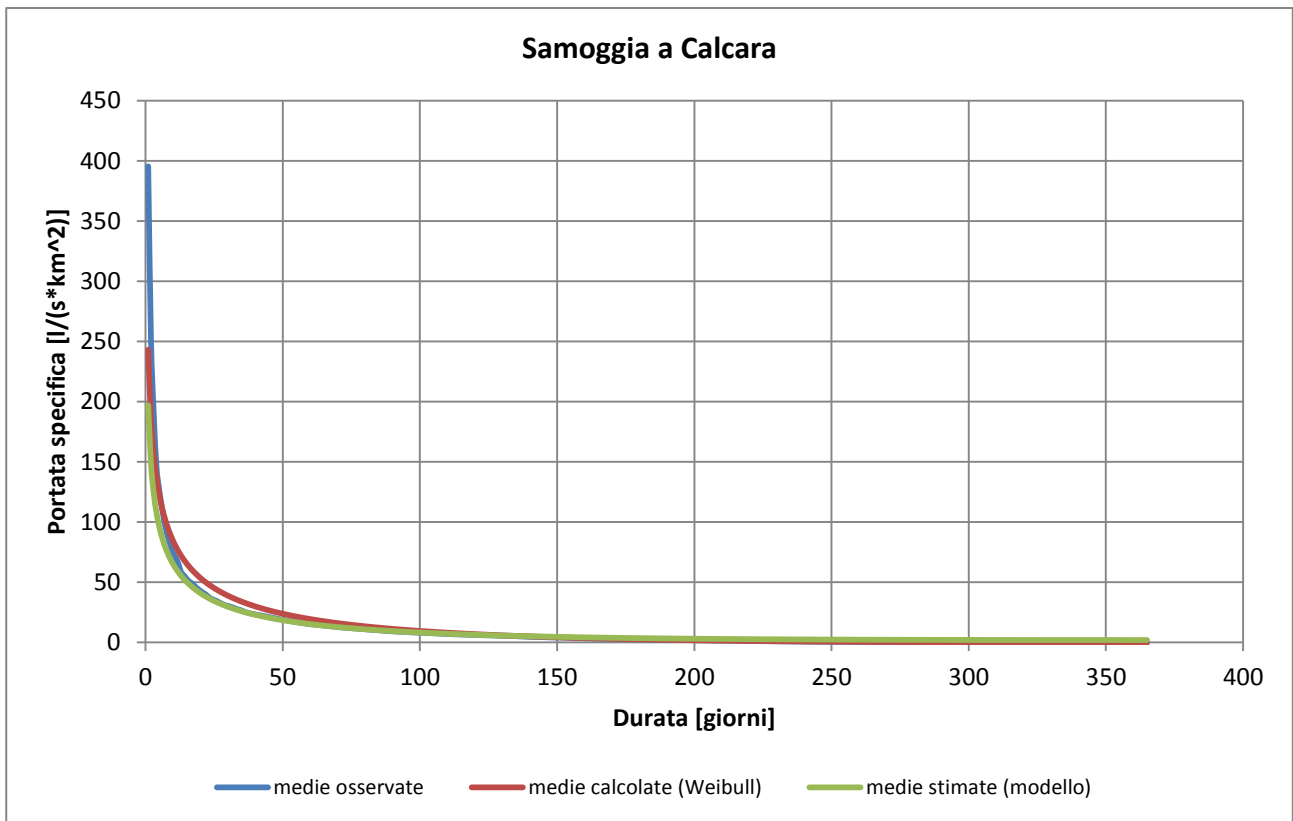


Fig. 60 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Samoggia a Calcara

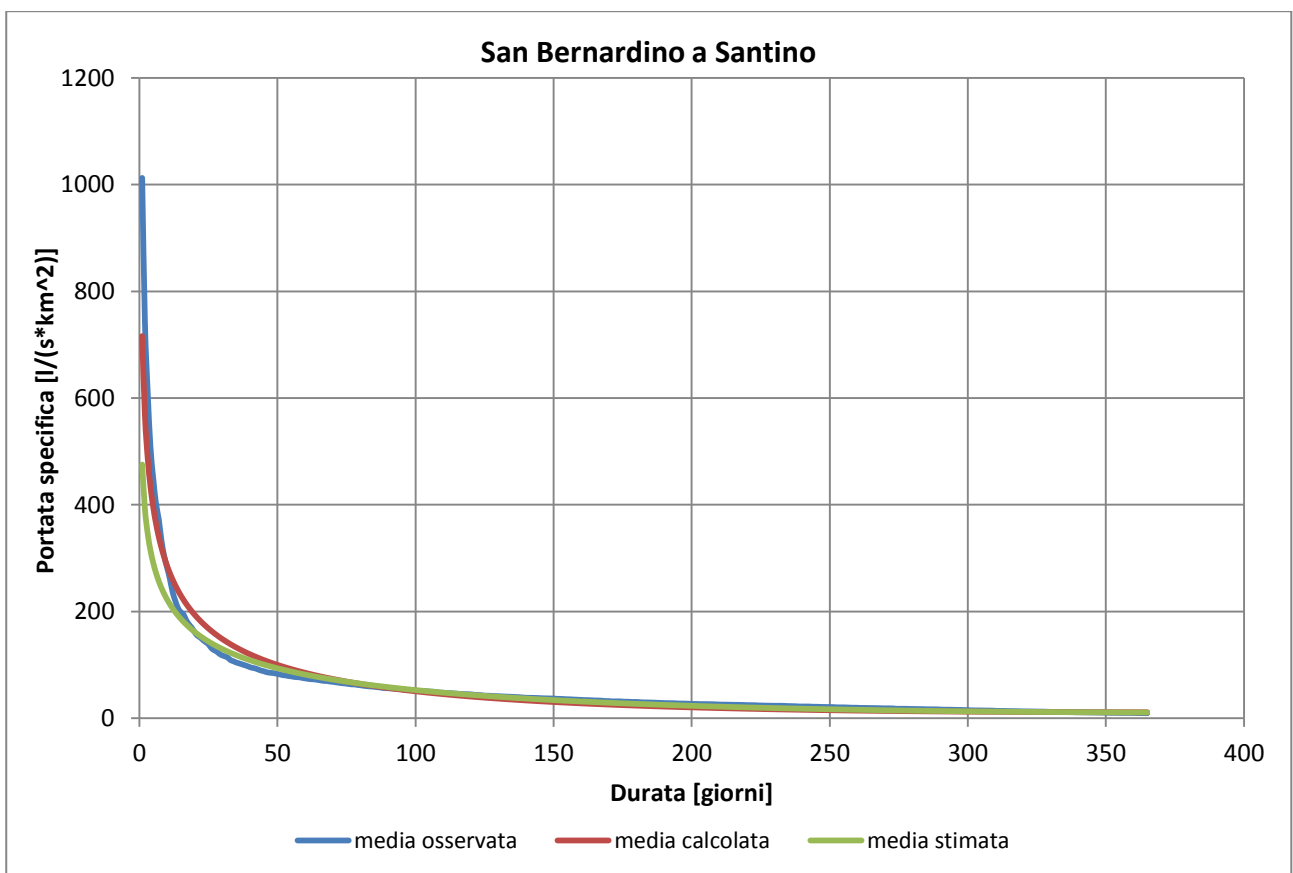


Fig. 61 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del San Bernardino a Santino

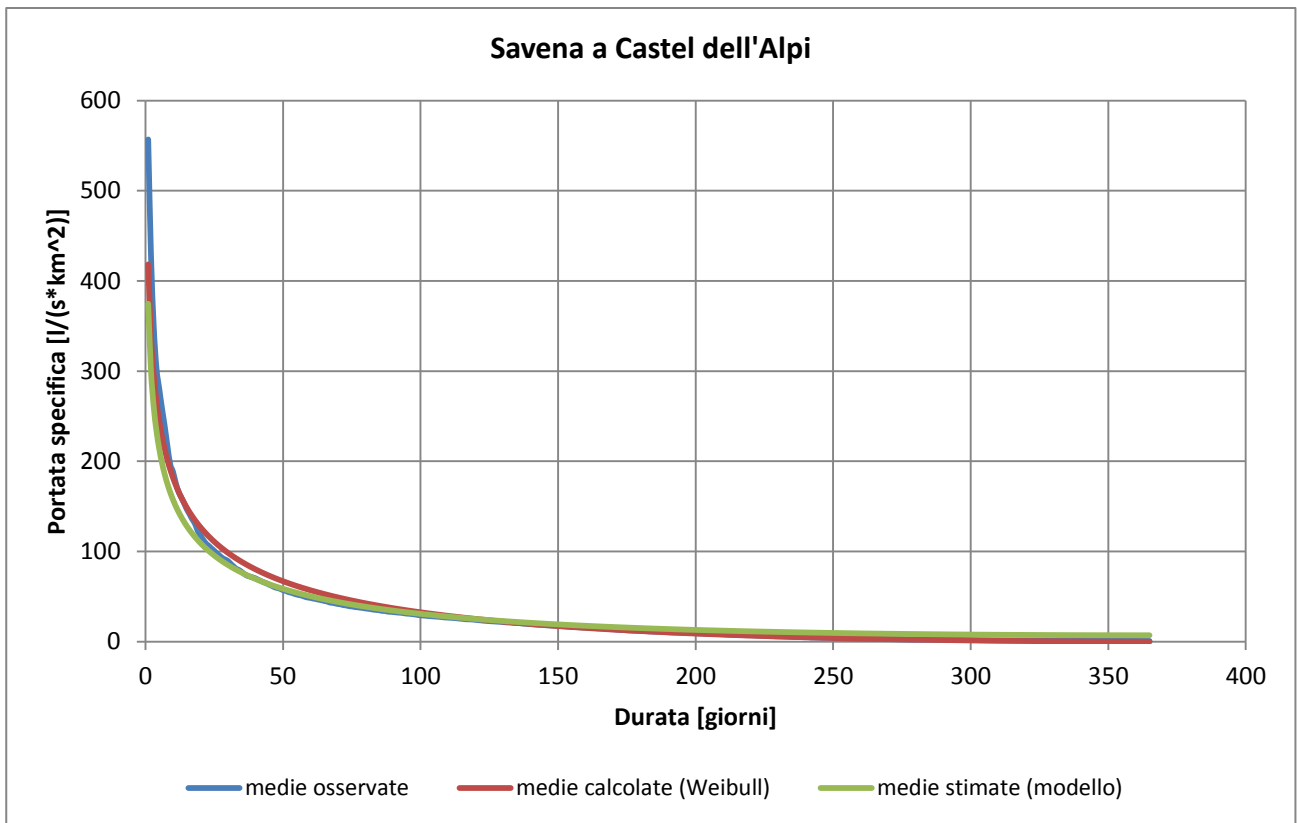


Fig. 62 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Savena a Castel dell'Alpi

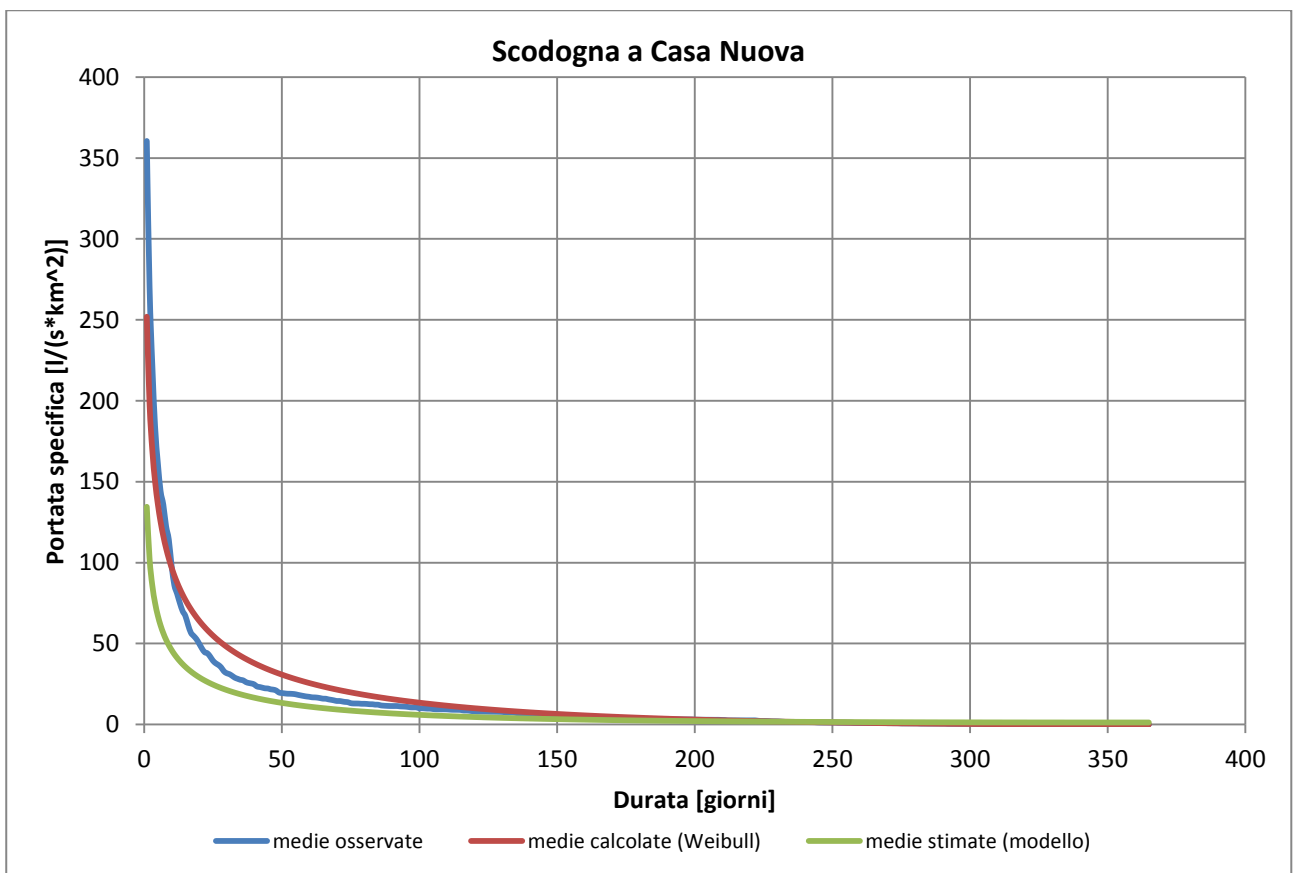


Fig. 63 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata dello Scodogna a Casa Nuova

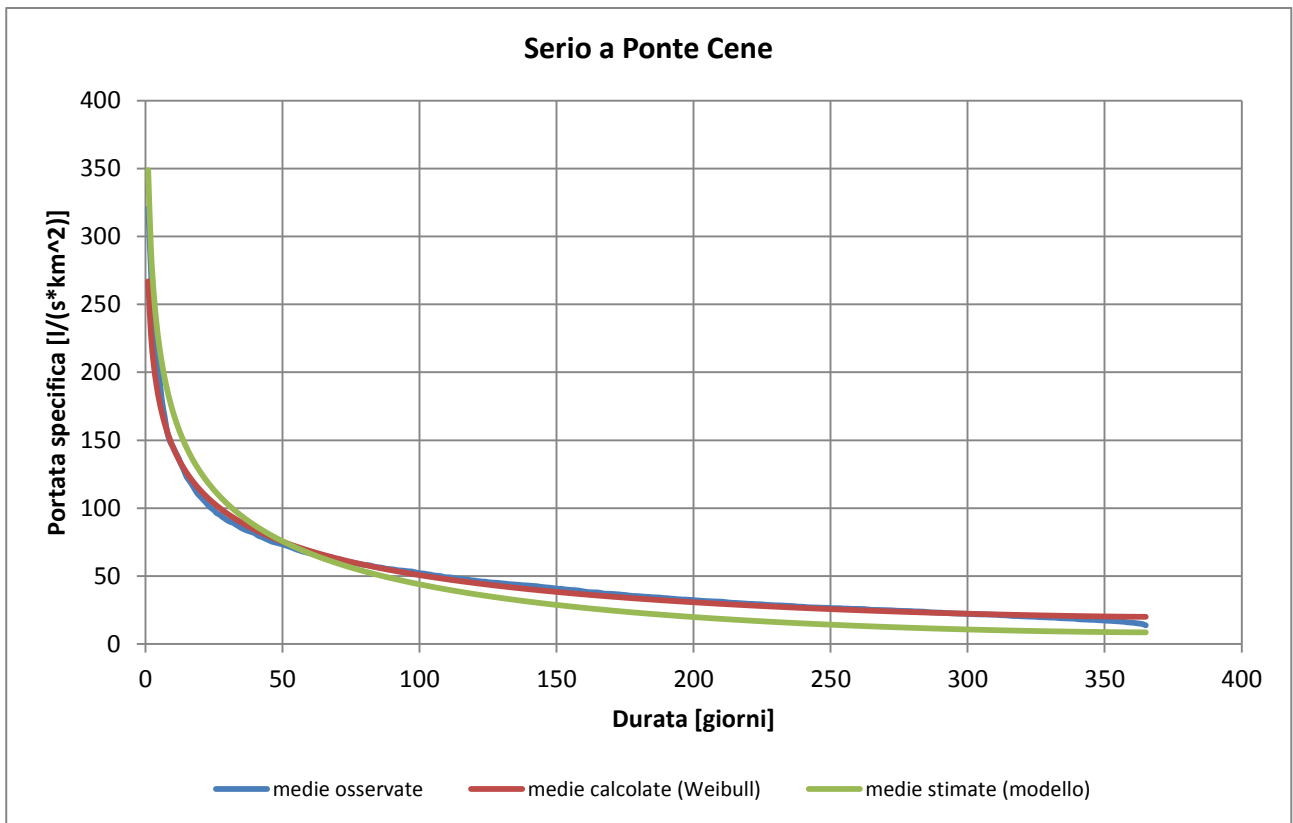


Fig. 64 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Serio a Ponte Cene

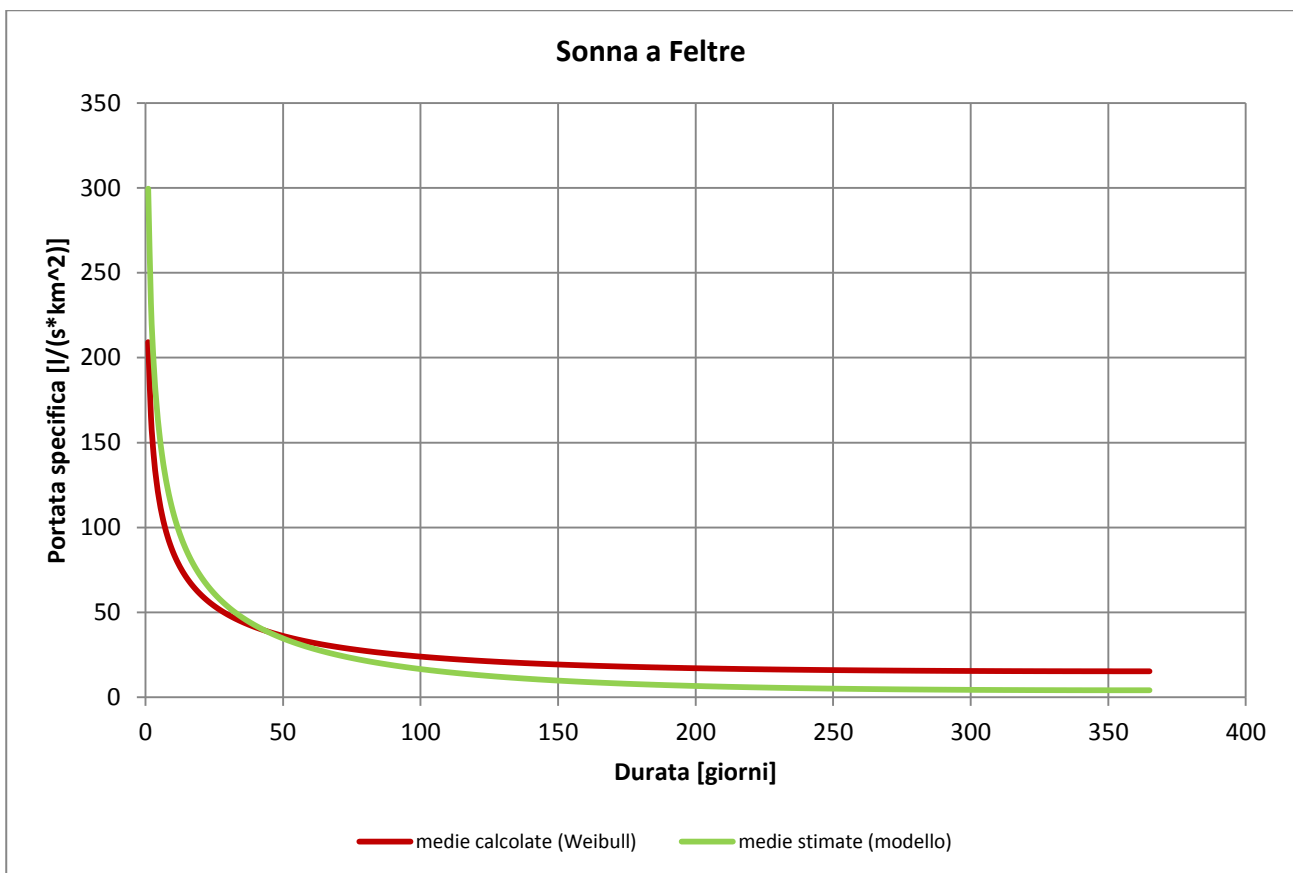


Fig. 65 Curva di durata media calcolata e stimata del Sonna a Feltre

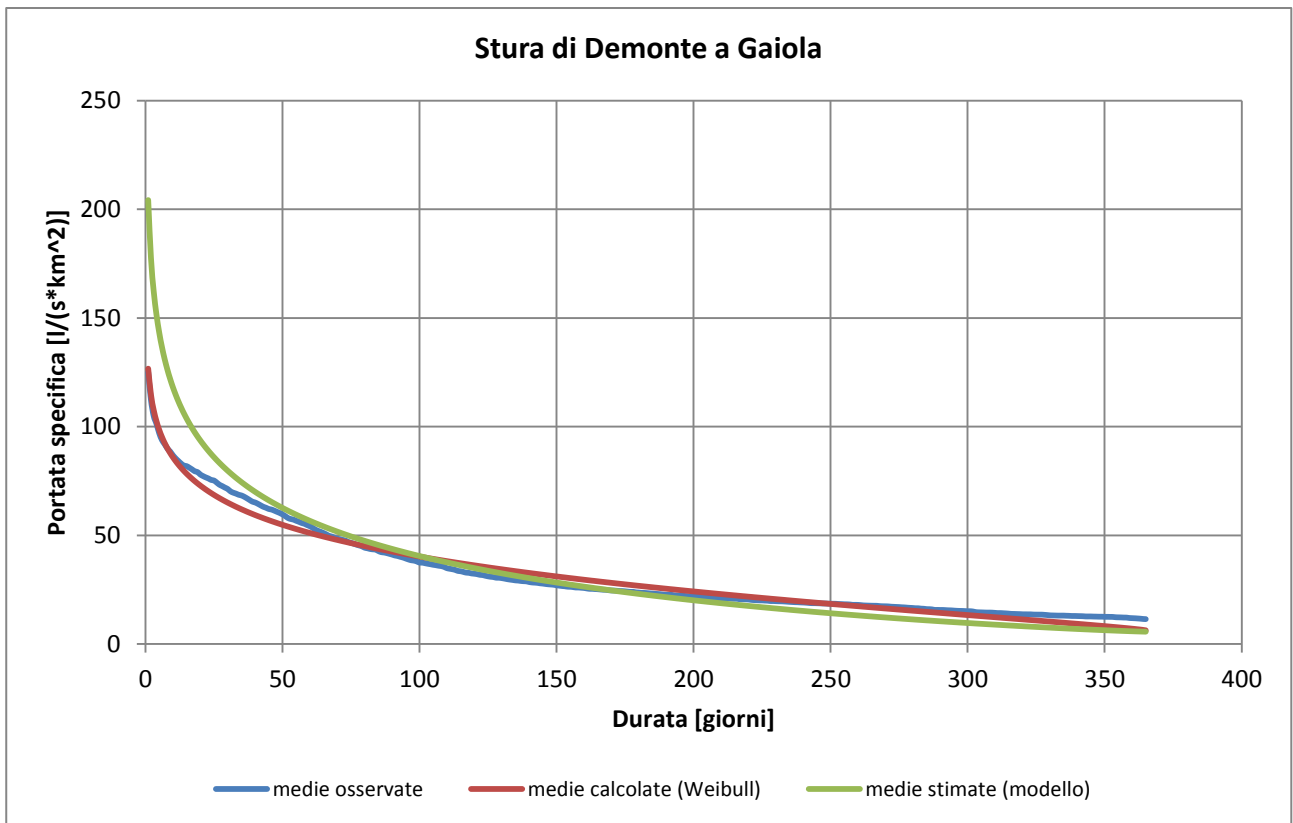


Fig. 66 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata dello Stura di Demonte a Gaiola

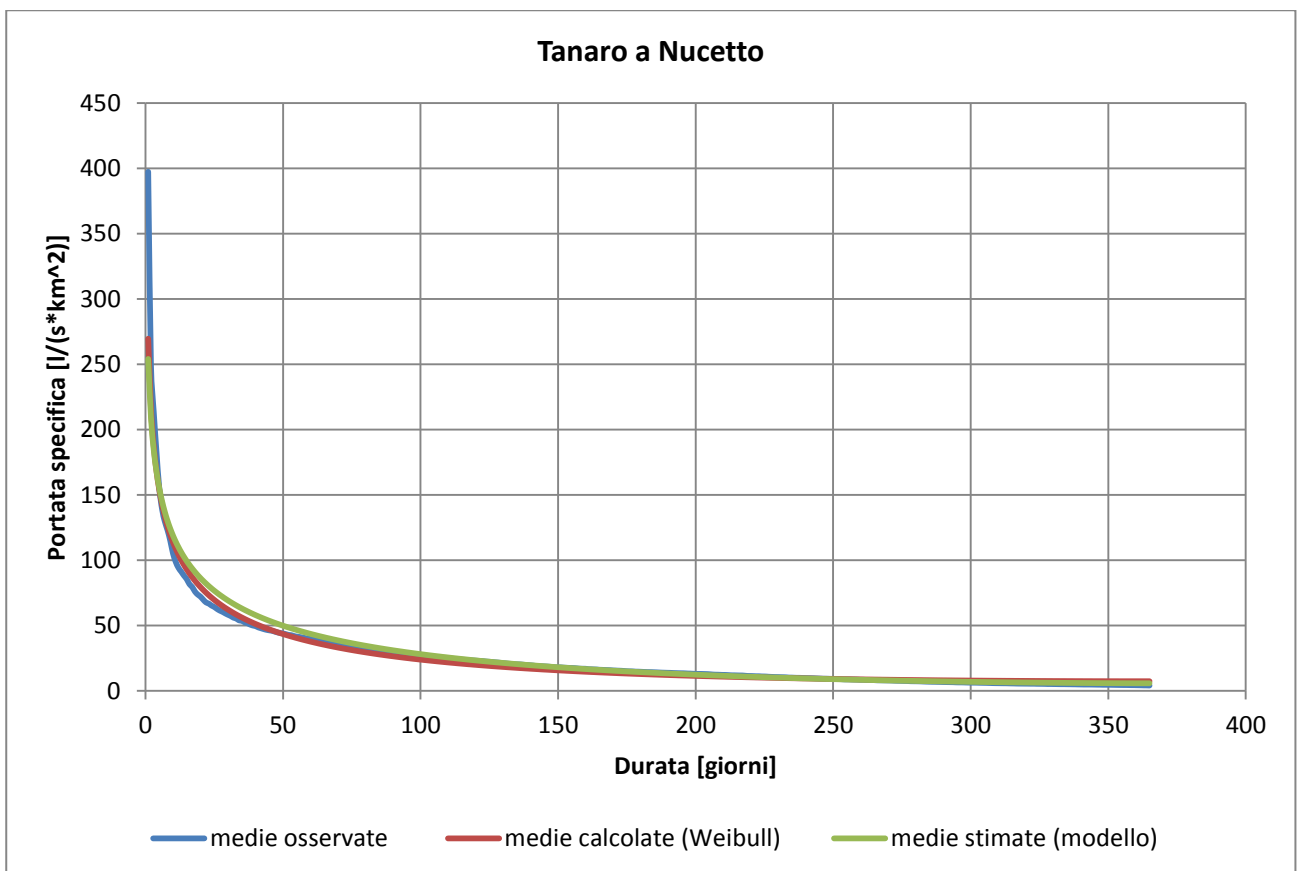


Fig. 67 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Tanaro a Nucetto

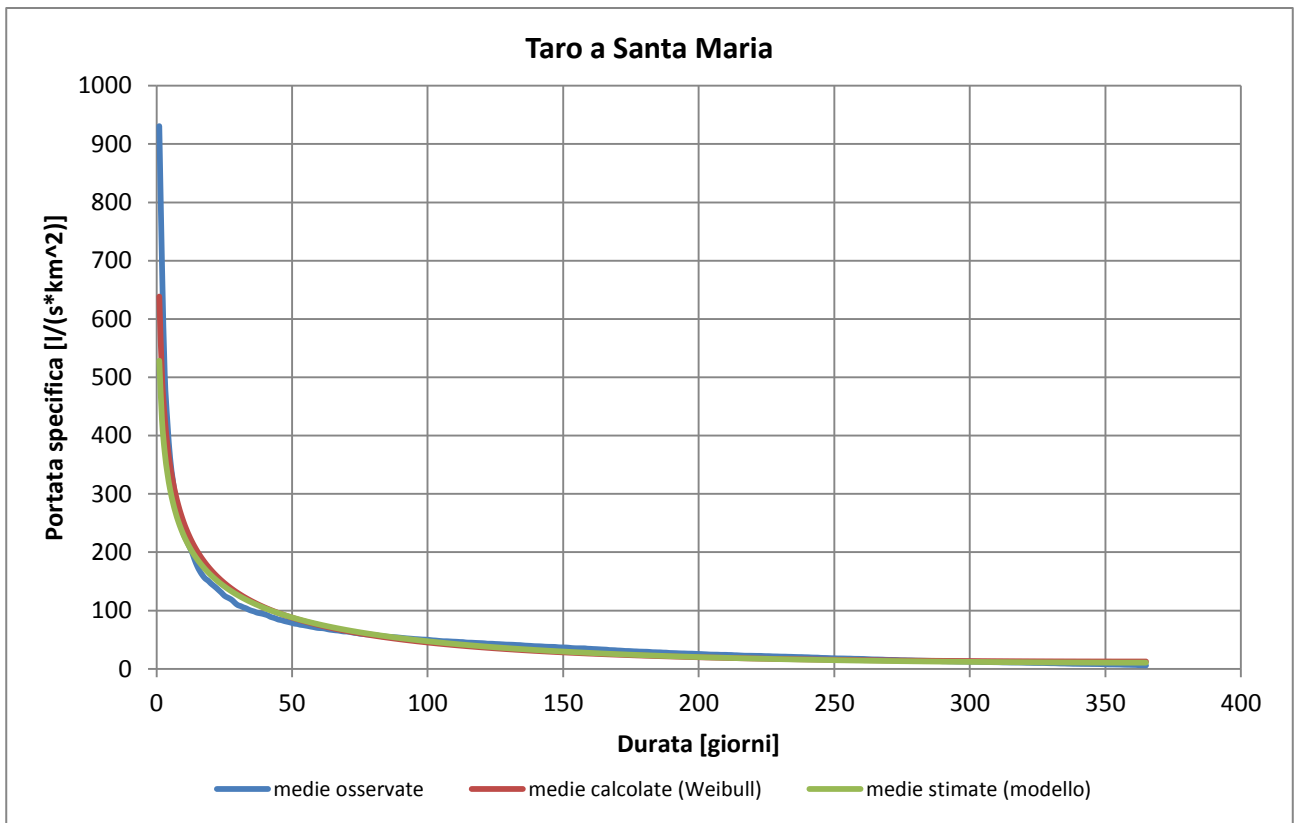


Fig. 68 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Taro a Santa Maria

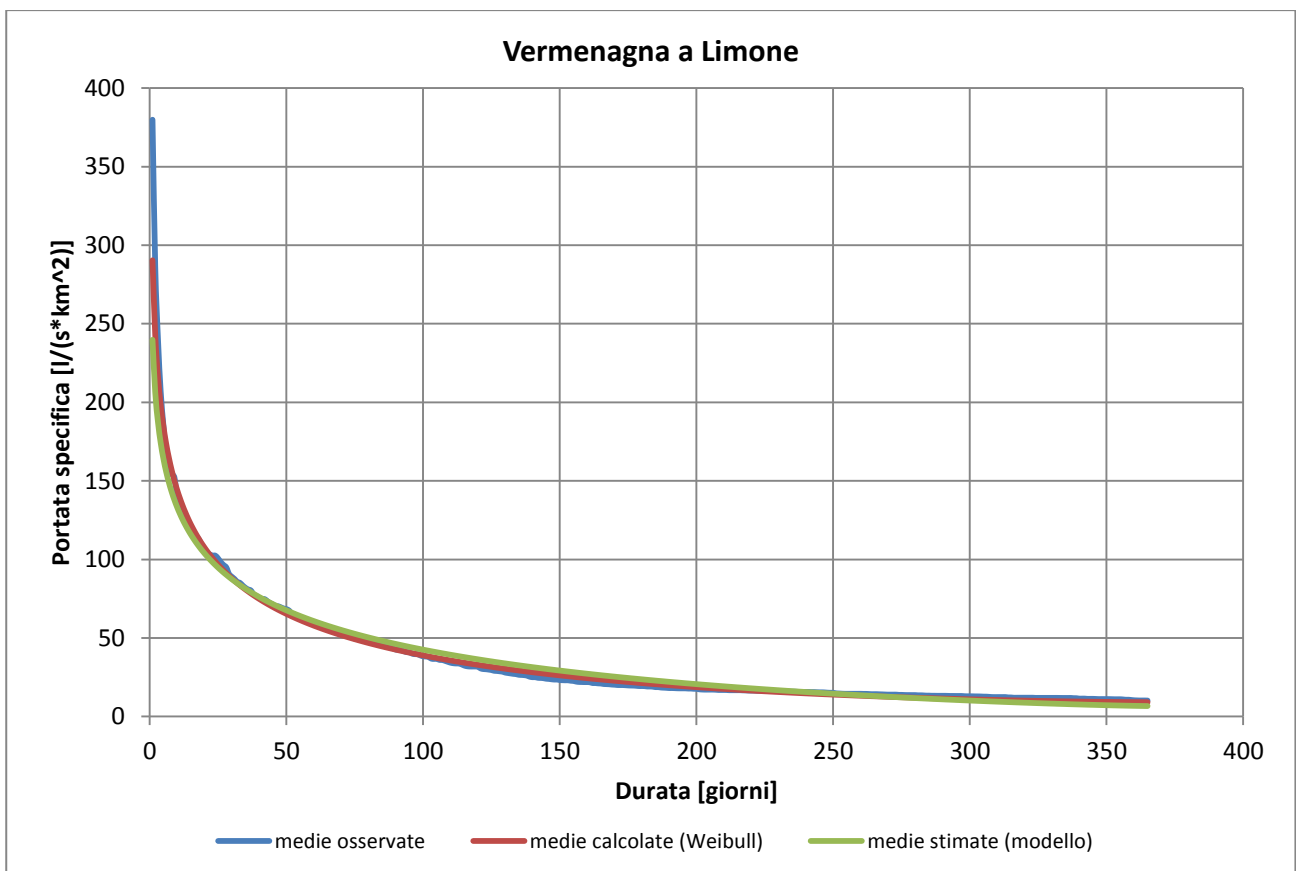


Fig. 69 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Vermenagna a Limone

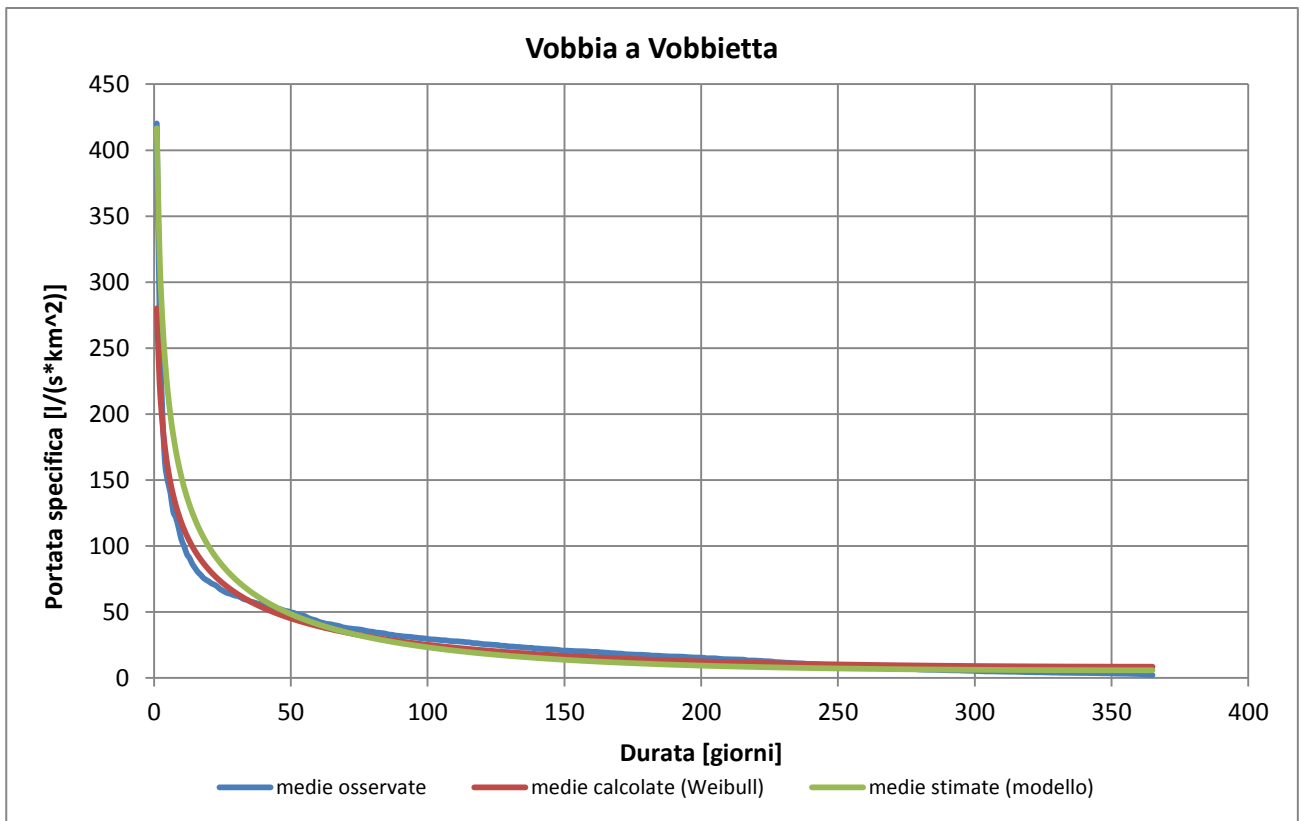


Fig. 70 Curva di durata media osservata, calcolata e stimata del Vobbia a Vobbietta

Bibliografia

Becciu G. , *dispense del corso di Costruzioni Idrauliche 2*, Politecnico di Milano, Anno Accademico 2012 – 2013

Bianchi A., *dispense delle esercitazioni del corso Impianti Speciali Idraulici*, Politecnico di Milano, Anno Accademico 2011 – 2012

Bissolati M., *Stima del parametro di forma per le curve di durata*, rel. Priscila Escobar Rojo, Tesi di laurea, Anno Accademico 2009 – 2010

Castellarin, G. Galeati , L. Brandimarte, A. Montanari, A. Brath, *Regional Flow – Duration Curves: reliability for ungauged basins*, Elsevier, 2004

Cozzi D., *La curva di durata regionalizzata. Analisi dei piccoli bacini* , rel. Priscila Escobar Rojo, Tesi di laurea, Anno Accademico 2009 – 2010

Crapella M., *La regionalizzazione della curva di durata delle portate nei bacini montani: Trentino-Alto Adige e Veneto*, rel. Priscila Escobar Rojo, Tesi di laurea, Anno Accademico 2009 – 2010

De Michele C., Rosso R., *Rapporto sulla valutazione delle piene in Italia Nord – Occidentale*, Consiglio Nazionale delle Ricerche GNDCI (Gruppo Nazionale per la Difesa della Catastrofi Idrogeologiche), 2001

Fennessey N. Vogel TR.M., *Regional Flow – Duration Curves for Ungauged Sites in Massachusetts*, ASCE

Ferro V., *La sistemazione dei bacini idrografici (seconda edizione)*, McGraw-Hill editore, ottobre 2006

Greppi M., *Idrologia (seconda edizione)*, Hoepli editore, 2005

Locatelli S., *Utilizzo del metodo jackknife per l'ottimizzazione dei parametri caratteristici della curva regionalizzata di durata delle portate secondo la distribuzione di Weibull*, rel. Priscila Escobar Rojo, Tesi di laurea, Anno Accademico 2010 – 2011

Maione U., Moisello U., *Elementi di statistica per l'idrologia*, La Goliardica Pavese editore, 2003

Minikou M., Koemaki S., *Regionalization of flow duration characteristics*, J. of Hidrol., vol. 82, pp. 77 – 91, 1985

Moisello U., *Idrologia Tecnica*, La Goliardica Pavese editore, 1999

Murray R.Spiegel, *Probabilità e Statistica*, gruppo editoriale Fabbri-Bompiani Sonzogno, ETAS Spa, 1979

Paoletti A., Bianchi A., Becciu G., Gambirasio G., *Disponibilità ed ottimizzazione nell'uso della risorsa idrica: parametri per lo sfruttamento idroelettrico*, Quaderni Regionali di Ricerca n. 33, Regione Lombardia, 1999

Quimpo R.G., Aleiandrino A.A., McNally T.A., *Regionalized flow duration curves for Philippines*, J. Water Res. Plan Management, ASCE, vol. 109(4), pp. 320 – 330, 1983

Songini G., *L'energia elettrica in Provincia di Sondrio 1883 – 1993*, Bonazzi grafica Sondrio, 1994

www.acq.isprambiente.it/annali/pdf/

www.arpa.emr.it

www.arpalombardia.it

www.arpaveneto.it

www.micro-hydro-power.com

www.ors.regione.lombardia.it

www.progettodighe.it

www.provincia.bz.it

www.provincia.tn.it

www.regione.piemonte.it/acqua

www.registroitalianodighe.it