

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria-Dipartimento di Elettronica e Informazione

Corso di Laurea Specialistica in
Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio



GESTIONE INTEGRATA DELLA PRODUZIONE
IDROELETTRICA E DEI SERVIZI ECOSISTEMICI NEL
BACINO DEL KAFUE

Relatore: Prof. Rodolfo Soncini Sessa

Correlatori: Ing. Andrea Castelletti
Ing. Enrico Weber

Tesi di Laurea di: Paolo Tesini

Matr. 735005

Anno Accademico 2009-2010

Ringraziamenti

*Il grazie è abituale sulle labbra di chi non si sente padrone di nulla e comprende
che nulla di ciò che ha è suo.*

don Oreste Benzi

Ringrazio sentitamente tutte le persone che hanno permesso la realizzazione di questo duro lavoro: il prof. Soncini Sessa e Andrea Castelletti per la disponibilità e professionalità dimostrate. Un particolare ringraziamento devo a Enrico Weber, che mi ha costantemente seguito in tutto questo percorso di tesi con ammirevole dedizione ed impegno, facendomi crescere molto sul piano professionale ed umano.

Ringrazio gli amici Flavio, Federico, Simone G., Matteo R., Simone L., Marco che, con la loro simpatia, hanno contribuito a rendere questi due anni di Laurea Specialistica indimenticabili e piacevoli. Un grazie a Daniela, Andrea M., Marcello, Matteo G., con cui ho condiviso questi mesi al LITA, durante i quali hanno sempre dimostrato disponibilità e amicizia nei miei confronti. Un grazie anche ad Ambrogio per i preziosi consigli.

Per la mia famiglia e Irene: nessuna parola può esprimere la riconoscenza verso le persone che hanno fatto tantissimo e mi sono sempre state accanto con consigli ed aiuto, condividendo con me gioie e difficoltà, a loro va tutta la gratitudine del mio cuore.

Indice

Introduzione	5
Glossario	7
1 Inquadramento geografico-territoriale	10
1.1 Il sistema dello Zambesi	10
1.2 Il sottosistema del Kafue	11
1.2.1 Inquadramento geografico	11
1.2.2 Regime idroclimatologico	13
1.2.3 Produzione idroelettrica	13
1.2.4 Produzione di canna da zucchero e soia	15
1.2.5 Agricoltura di recessione	15
1.2.6 Kafue Flats	16
1.3 Studi effettuati sull'area	20
1.4 Regolazione attuale dei due serbatoi	22
1.5 Scopo della tesi	23
2 Criteri e indicatori	24
2.1 Idroelettrico	26
2.1.1 Itezhi-tezhi	26
2.1.2 Kafue Gorge	26
2.2 Canna da zucchero e soia	27
2.2.1 Stima della domanda irrigua	27
2.3 Agricoltura di recessione	33
2.4 Kafue Flats	34
3 Modello	40
3.1 Bacino di Itezhi-tezhi	42

3.2	Serbatoio di Itezhi-tezhi	44
3.2.1	Livelli	44
3.2.2	Evaporazione	45
3.2.3	Superficie	46
3.2.4	Rilascio	46
3.2.5	Curve di massimo e minimo rilascio	53
3.3	Centrale idroelettrica di Itezhi-tezhi	55
3.4	Canale	56
3.5	Bacino delle Kafue Flats	57
3.6	Serbatoio delle Kafue Flats	60
3.6.1	Evaporazione	63
3.6.2	Superficie	64
3.6.3	Scala di deflusso	65
3.7	Traversa irrigua	66
3.8	Serbatoio di Kafue Gorge	66
3.9	Centrale idroelettrica di Kafue Gorge	69
4	Formulazione del problema di controllo	71
4.1	Apprendimento per rinforzo batch basato sugli alberi	73
4.1.1	L'algoritmo di fitted Q-iteration	74
4.1.2	Il dataset di apprendimento	77
4.1.3	L'approssimatore di funzione	79
5	L'esplorazione della frontiera di Pareto e stima degli effetti	81
5.1	Generazione della frontiera di Pareto	81
5.2	Analisi della frontiera di Pareto	85
5.3	Alternativa 9	87
5.3.1	Idroelettrico	90
5.3.2	Canna da zucchero e soia	90
5.3.3	Agricoltura di recessione	93
5.3.4	Kafue Flats	93
	Conclusioni e possibili sviluppi	95
A	La procedura PIP	100
	Bibliografia	105

Introduzione

Negli ultimi anni l'acqua sta diventando una risorsa sempre più rara e preziosa per la crescita demografica, lo sviluppo economico nei paesi emergenti e i cambiamenti climatici, che riducono o modificano la distribuzione delle piogge nello spazio e nel tempo. Inevitabilmente, quando una risorsa scarseggia nascono conflitti sul suo uso, pertanto è fondamentale, affinché la situazione non degeneri diventando insostenibile, che la domanda idrica per i bisogni umani sia conciliata con la disponibilità naturale di acqua. Per questo motivo l'attenzione degli studiosi della gestione delle risorse naturali si rivolge sempre di più alle tecniche di gestione integrata e partecipativa, affinché siano considerati tutti gli interessi in gioco e tutti i portatori di interesse insieme contribuiscano alla ricerca delle soluzioni da adottare.

Il problema della scarsità dell'acqua è sentito soprattutto nell'Asia e nell'Africa sub-sahariana: in questi paesi in via di sviluppo vi è una richiesta notevole di produzione di energia; i bacini artificiali sono, quindi, spesso regolati esclusivamente al fine di ottenere una maggiore produzione idroelettrica e vengono trascurati altri aspetti (ad esempio l'ambiente) di notevole importanza.

Il lavoro della presente tesi riguarda proprio un Paese che per numero di abitanti, per povertà e grande importanza ambientale, richiede una razionale gestione delle risorse idriche: lo Zambia. Più precisamente viene preso in esame il fiume Kafue, un affluente dello Zambesi con l'obiettivo di colmare la lacuna esistente: attualmente i due serbatoi Itezhi-tezhi e Kafue Gorge sono regolati attraverso *rule-curve* e con il solo obiettivo della produzione di energia idroelettrica. In questa tesi vi è il progetto della politica di gestione congiunta del serbatoio di Itezhi-tezhi e di quello di Kafue Gorge, al fine di migliorare la produzione idroelettrica e considerare anche le esigenze ambientali, poiché tra i due serbatoi si trovano le Kafue Flats, una vasta area umida di elevato pregio ambientale, influenzata significativamente dalla regolazione dei due serbatoi.

E' stato seguito, per raggiungere questo scopo, lo schema della procedura di

Pianificazione Integrata e Partecipata (PIP), sviluppata dal Politecnico di Milano [51] e ispirata al paradigma della Integrate Water Resource Management (IWRM) (i dettagli della procedura PIP sono riportati nell'appendice A).

Il presente lavoro segue le seguenti fasi:

- analisi del contesto geografico, ambientale ed economico;
- individuazione dei portatori di interesse e delle loro esigenze;
- formalizzazione degli indicatori che permettono di quantificare gli effetti delle diverse azioni gestionali considerate;
- identificazione dei modelli dei vari componenti del sistema e del modello globale per poter calcolare gli indicatori;
- formulazione e soluzione del problema di controllo ottimo.

Per orientare il lettore, di seguito, viene proposta una breve descrizione dei capitoli presenti in questa tesi.

Il **Capitolo 1** descrive le caratteristiche principali del sistema dello Zambesi e le caratteristiche geografiche, economiche ed ambientali del sottosistema del Kafue. Al termine del capitolo vengono presentati gli studi precedentemente effettuati sulla area studio, la politica di regolazione esistente e viene formulato l'obiettivo della tesi: progettare la politica di regolazione congiunta del serbatoio di Itezhi-tezhi e di quello di Kafue Gorge, tenendo conto della presenza delle Kafue Flats.

Il **Capitolo 2** contiene la formulazione dei criteri e degli indicatori per ciascun settore che raggruppa portatori con interessi simili.

Il **Capitolo 3** presenta il modello dei componenti del sistema da monte a valle; in particolare le Kafue Flats sono descritte come un serbatoio virtuale, che è un componente dinamico.

Nel **Capitolo 4** sono esposte le possibili metodologie risolutive del problema del progetto della politica di gestione e viene descritto l'algoritmo *fitted Q-batch*, utilizzato per risolvere il problema della gestione congiunta dei due serbatoi del sistema del Kafue.

Nel **Capitolo 5** è presentata la frontiera di Pareto formata dai punti ottenuti con diverse combinazioni di pesi degli indicatori; viene analizzata l'alternativa 9 che risulta di particolare interesse.

Infine sono esposte le conclusioni del presente lavoro e i possibili sviluppi futuri.

Nell'**appendice A** è descritta in dettaglio la procedura PIP.

Per facilitare la lettura viene allegato di seguito un breve glossario dei principali termini tecnici.

Glossario

Alternativa: insieme delle combinazioni possibili degli interventi che si possono attuare.

Controllo: variabile sotto il nostro diretto controllo; nel caso di un sistema formato da un serbatoio, il controllo è costituito dalla decisione di rilascio.

Costo per passo: misura dell'indicatore ad ogni passo temporale; il termine costo non indica necessariamente un effetto negativo ma può anche essere un beneficio.

Criterio foglia: criterio di livello più basso, al quale è possibile associare un indicatore.

Criterio di valutazione: attributo o fattore, attraverso il quale un portatore di interesse giudica le prestazioni di un'alternativa rispetto al suo specifico interesse.

Discretizzazione delle variabili: procedura, grazie alla quale, si associa alle variabili un numero finito di valori.

Frontiera di Pareto: insieme delle alternative che non sono dominate da altre alternative.

Gestione: insieme di azioni, che concernono per lo più la distribuzione della risorsa nello spazio e nel tempo, realizzate periodicamente.

Indicatore: procedure di misura associate ai criteri-foglia.

Legge di controllo: funzione monotona crescente con il valore dell'invaso che

ad ogni valore di stato associa uno o più valori di controllo.

Obiettivo: funzione deterministica delle variabili di decisione, potrà essere massimizzata o minimizzata rispetto ad esse.

Politica di regolazione: sequenza temporale, in genere periodica, di leggi di controllo, ciascuna delle quali fornisce il controllo.

Separabilità: proprietà di un indicatore che richiede che, il valore di un indicatore in un istante, non dipende dal valore da esso assunto nell'istante precedente.

Settore: suddivisione dei portatori di interesse che raccoglie portatori che hanno interessi comuni.

Stato: variabile che dipende dal suo valore all'istante precedente.

Capitolo 1

Inquadramento geografico-territoriale

Lo Zambia prende il nome dal fiume Zambesi che scorre da nord a sud nella parte occidentale del Paese e forma il confine meridionale dello Stato, dopo che il suo corso ha piegato in direzione est verso l'Oceano Indiano. Lo Zambia si trova nella parte meridionale del Continente africano (Fig. 1.1); non ha sbocchi sul mare. Confina a nord e nord-ovest con la Repubblica Democratica del Congo, a nord-est con la Tanzania, a est con il Malawi, a sud-est con il Mozambico, a sud con lo Zimbabwe, a sud-ovest con il Botswana e la Namibia e a ovest con l'Angola. Ha un'estensione di 752 614 km².

1.1 Il sistema dello Zambesi

Il fiume Zambesi è il quarto fiume africano per lunghezza (2574 km) ed ha un bacino idrografico di 1 500 000 km² (Fig. 1.2).

L'alto corso del fiume presenta numerosi affluenti, il principale è il Cuando (lungo 800 km); a valle della confluenza del Cuando con lo Zambesi si trovano le Victoria Falls, grandiose cascate, che segnano l'inizio del corso medio del fiume. A valle delle Victoria Falls, tra il 1955 e il 1959, è stata costruita la diga di Kariba, che ha creato un serbatoio della capacità di 110 miliardi di m³ di acqua.

Il corso medio è caratterizzato da cateratte e rapide e lo Zambesi riceve da sinistra il fiume Kafue e il Luangwa, mentre scarsi sono i contributi degli affluenti di destra, poiché provengono da regioni semiaride. Il fiume Kafue presenta due serbatoi regolati: il serbatoio di Itezhi-tezhi e quello di Kafue Gorge. Al termine del corso

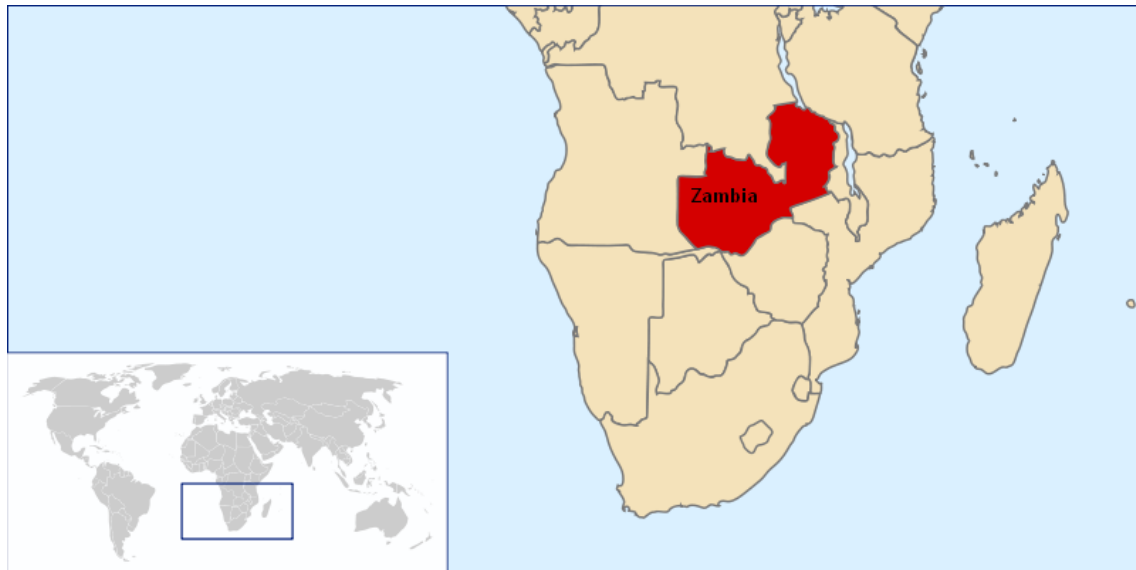


Figura 1.1: Lo Zambia è situato nell’Africa meridionale.

medio del fiume si trova il serbatoio di Cabora Bassa, creato grazie alla costruzione della omonima diga, ultimata nel 1974.

Il corso inferiore dello Zambesi ha inizio dalle cascate di Quebrasa; 180 km prima della foce, lo Zambesi viene alimentato dalle acque dello Sciré.

Dal punto di vista climatologico vi sono due zone ben distinte: la zona settentrionale presenta un clima tropicale molto piovoso (fino a 1400 mm/anno), mentre la zona meridionale è più arida.

1.2 Il sottosistema del Kafue

In questa tesi viene preso in considerazione un sottosistema dello Zambesi: il Kafue. Le sezioni di chiusura sono le seguenti:

- a monte, il bacino imbrifero di Itezhi-tezhi,
- immediatamente a valle della centrale di Kafue Gorge, poco più a est del serbatoio di Kafue Gorge (Fig. 1.3).

1.2.1 Inquadramento geografico

Il fiume Kafue è lungo circa 1577 km e il suo bacino imbrifero è di 155 000 km² [54]. E’ il più studiato e sviluppato dei bacini fluviali dello Zambia [26]. Il fiume nasce a

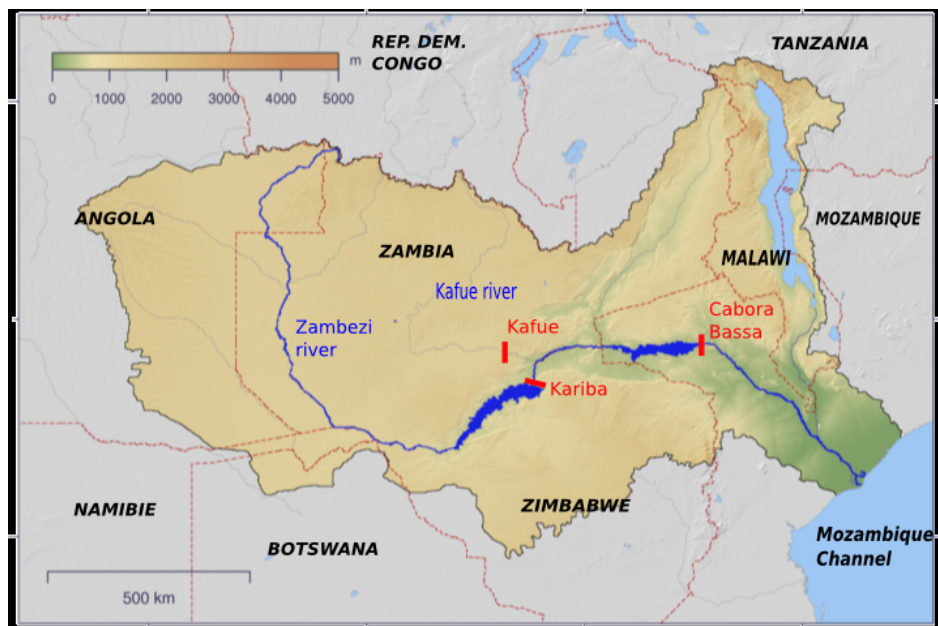


Figura 1.2: Il bacino dello Zambesi.

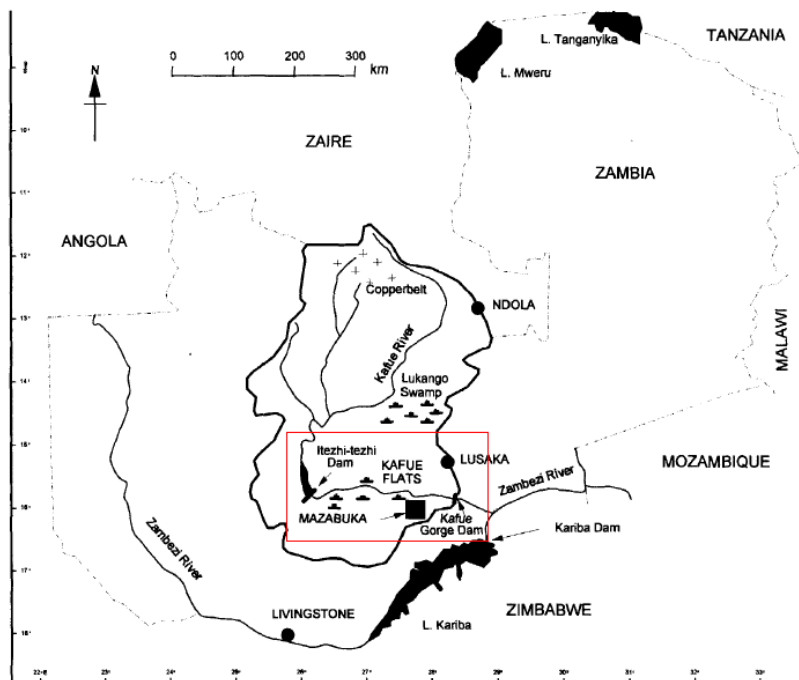


Figura 1.3: Il bacino del Kafue; l'area studio è delimitata in rosso [31].

1350 m s.l.m., al confine tra lo Zambia e la Repubblica Democratica del Congo, 120 km a nord-ovest della città di Chingola. Prima di gettarsi nel lago di Itezhi-tezhi il Kafue bagna il Copperbelt, una regione dello Zambia, ricca di depositi di rame e forma una zona umida in prossimità di Lukanga Swamp (una depressione circolare).

A valle del serbatoio di Itezhi-tezhi, prima di confluire nel serbatoio di Kafue Gorge, il fiume forma le Kafue Flats, un'ampia zona umida di grande pregio ambientale e scorre attraverso una importante regione produttrice di canna da zucchero.

Kafue Gorge è un serbatoio creato per permettere lo sfruttamento idroelettrico delle acque del Kafue, ottenuto sbarrando con una diga delle profonde gole naturali. In prossimità di Kafue Gorge vive metà della popolazione dello Zambia e la capitale Lusaka è situata a nord di esso.

La confluenza tra il Kafue e lo Zambesi si trova circa 20 km a nord della città di Chirundu.

1.2.2 Regime idroclimatologico

Per quanto riguarda il clima, la regione del Kafue è caratterizzata da tre stagioni: calda e umida (piogge) da novembre ad aprile, fresca e secca da maggio ad agosto e calda e secca da settembre a ottobre. L'inizio della stagione delle piogge si ha tra fine ottobre e inizio novembre, mentre nel picco della stagione delle piogge (dicembre, gennaio, febbraio) si hanno dalle 7 alle 10 ore di pioggia al giorno. Le abbondanti piogge causano rilevanti portate del fiume: come si può vedere in Fig. 1.5 le portate presentano una elevata autocorrelazione annuale, a causa della regolarità dei picchi.

Quanto all'evaporazione essa ha diversa intensità presso il serbatoio di Itezhi-tezhi e presso il serbatoio di Kafue Gorge: l'intensità maggiore si registra sul bacino di Kafue Gorge (Fig. 1.4).

1.2.3 Produzione idroelettrica

Il regime idrogeologico del basso Kafue e delle Kafue Flats è stato modificato in modo significativo dalla costruzione di due dighe, realizzate per produrre energia idroelettrica. La diga di Kafue Gorge è stata ultimata nel 1971 ed è in grado di immagazzinare $785 \cdot 10^6$ m³; vi è un dislivello di 400 m al termine del serbatoio di Kafue Gorge e questo permette uno sfruttamento idroelettrico [35], [33]. La potenza della centrale di Kafue Gorge è di 900 MW e per mantenere 450 MW di energia

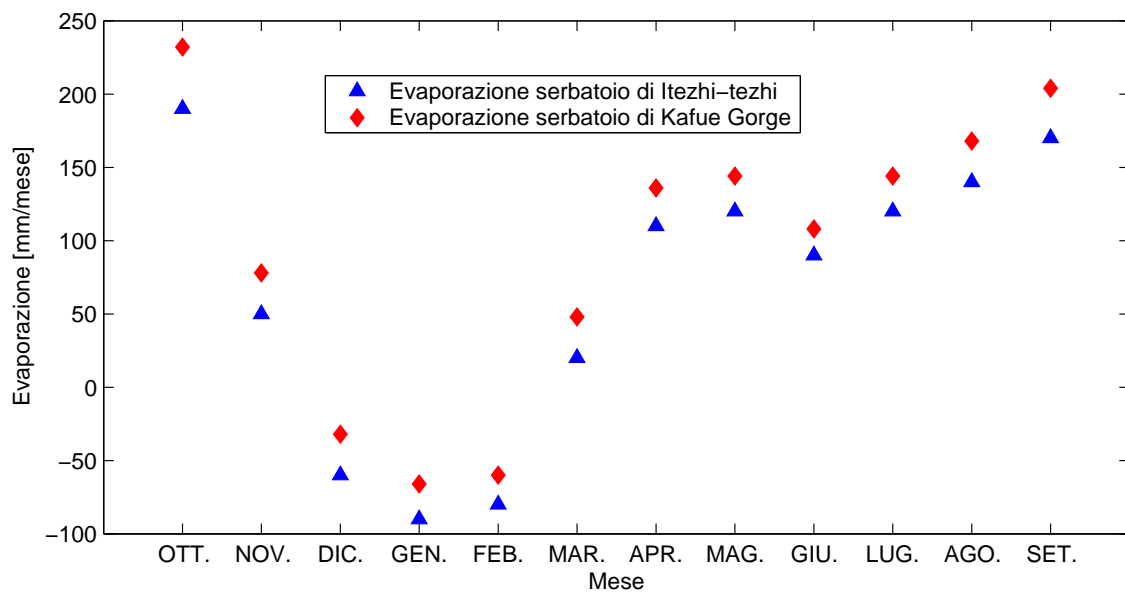


Figura 1.4: Dati mensili di evaporazione, misurati tramite una "pan" posta in corrispondenza del serbatoio di Itezhi-tezhi e di Kafue Gorge; i valori negativi indicano che la pioggia ha superato l'evaporazione.

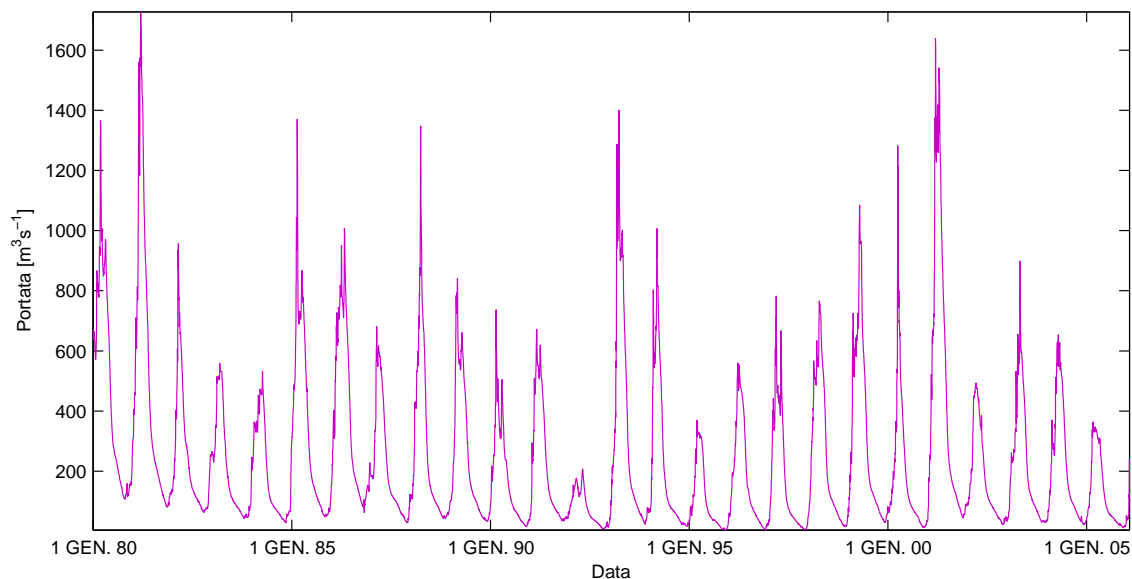


Figura 1.5: Portata giornaliera del fiume Kafue a Hook Bridge: gennaio 1980 - dicembre 2005.

prodotta, necessita di uno scarico minimo di $120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ [17] poiché le variazioni di livello non sono rilevanti ¹. Per mantenere questo flusso, a monte delle Kafue Flats, a 450 km di distanza da Kafue Gorge è stata costruita una seconda diga: la diga di Itezhi-tezhi conclusa nel 1978, il cui serbatoio, che ha una capacità massima di $6000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ [17], approvvigiona acqua durante la stagione umida. E' in progetto una centrale ai piedi della diga di Itezhi-tezhi costituita di due unità di 120 MW l'una. Gli impianti idroelettrici di Itezhi-tezhi a ovest e Kafue Gorge al margine orientale delle Kafue Flats sopperiranno al fabbisogno elettrico dello Zambia e permetteranno di esportare energia elettrica nei Paesi vicini.

1.2.4 Produzione di canna da zucchero e soia

Gli abitanti dell'area si dedicano prevalentemente all'agricoltura su piccola scala, alla pastorizia e alla coltivazione di canna da zucchero e soia. La canna da zucchero è la produzione agricola principale; essa si produce a Mazabuka, 130 km a sud-ovest di Lusaka, dove il clima è generalmente caldo e umido con una temperatura massima di 32°C a ottobre e una minima di 10°C tra aprile e agosto [31]. L'area di produzione di canna da zucchero è di circa 266 km^2 : questo comporta un grande fabbisogno di acqua. Gli stabilimenti per la lavorazione della canna da zucchero offrono possibilità di lavoro e attirano un numero crescente di persone che creano un aumento delle necessità alimentari e un incremento delle attività legate all'agricoltura, alla pesca e all'allevamento.

1.2.5 Agricoltura di recessione

Con il termine "agricoltura di recessione" si intende la pratica agricola che consiste nel coltivare i terreni precedentemente inondati: l'acqua quando si ritira lascia un terreno fertile che è possibile coltivare. Storicamente questo è sempre avvenuto nelle Kafue Flats, perchè la formazione della zona umida seguiva la stagionalità delle piogge. Con la regolazione dei laghi il regime naturale si è modificato notevolmente, sono diminuite le piene e le magre e l'area umida è inondata pressoché costantemente, di conseguenza non è più possibile praticare questo tipo di agricoltura [49].

¹La produzione varia prevalentemente con la portata.

1.2.6 Kafue Flats

Il Kafue scorre dal serbatoio di Itezhi-tezhi a Kafue Gorge per 450 km e attraversa le paludi denominate Kafue Flats, che formano un'area umida vasta circa 6500 km² e larga circa 60 km [10] (Figg. 1.6, 1.7). Il fiume impiega sei settimane a coprire la distanza tra i due invasi [31], a causa della bassissima pendenza (8 m in 200 km).

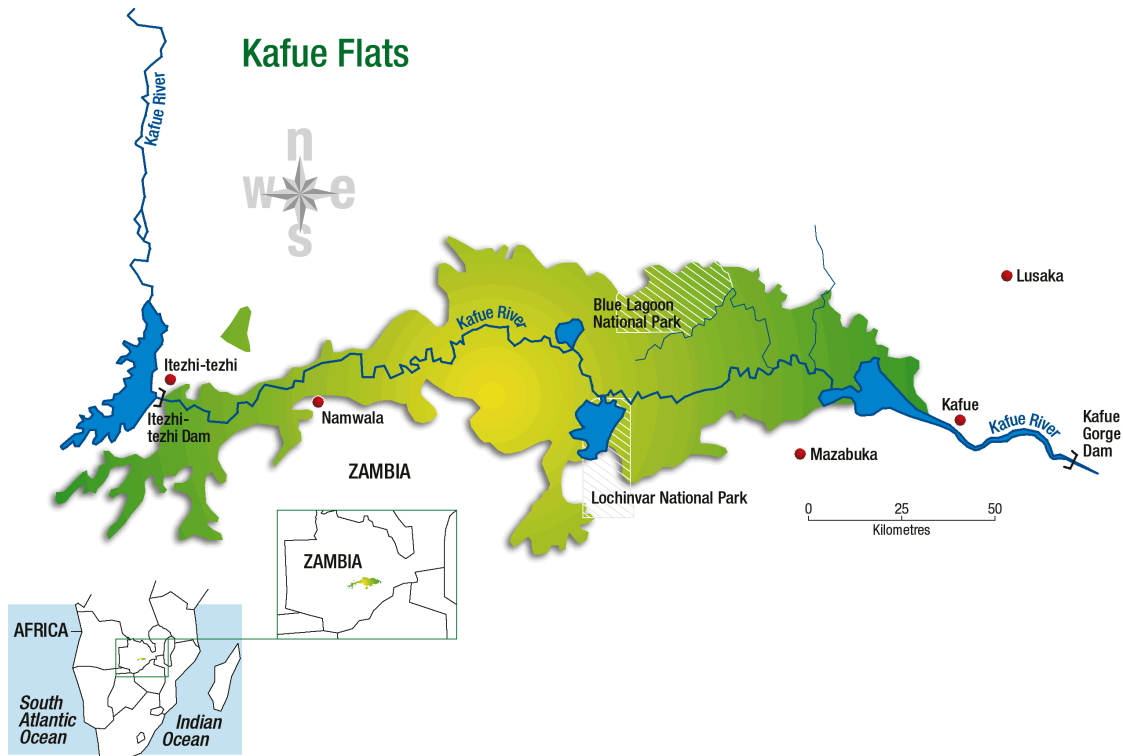


Figura 1.6: Mappa delle Kafue Flats.

Le precipitazioni, la cui media annuale è di 800 mm, sono concentrate prevalentemente nella stagione umida e contribuiscono all'allagamento delle paludi [33]. Il maggiore responsabile dell'inondazione delle paludi è il Kafue, poiché i valori di portata superiori a $170 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ favoriscono l'inondazione dell'area [26].

Le Kafue Flats sono uno dei più significativi ecosistemi dello Zambia e comprendono un insieme di lagune e aree umide che creano un habitat naturale dove vivono importanti specie di animali terrestri, pesci e uccelli acquatici [1].

L'avifauna delle Kafue Flats è molto rilevante: sono presenti più di 400 specie di uccelli, delle quali 125 sono stanziali dell'area umida e le restanti sono migranti. Le principali specie sono: *Ardeola ralloides*, *Bubulcus ibis*, *Egretta ardesiaca* e soprattutto *Burgeranus carunculatus* (Fig. 1.8). Quando arriva la stagione secca e



Figura 1.7: Kafue Flats.

le acque si ritirano diventa significativa la presenza di specie di passeriformi, come *Calandrella cinerea* e *Eremopterix leucotis*.

Per quanto riguarda i mammiferi le aree umide sono adatte alla presenza di bufali (*Syncerus caffer*), oribi (*Ourebia ourebi*), gnu (*Connochaetes taurinus*), zebre (*Equus burchelli*) e varie specie di antilopi, tra le quali spicca la specie locale *Kobus leche kafuensis* (Fig. 1.9), che costituisce la specie più rilevante dell'area.

Le Kafue Flats sono un'area protetta dalla convenzione di Ramsar e in essa sono presenti i seguenti parchi nazionali: Lochinvar National Park e Blue Lagoon National Park (Fig. 1.6).

Il Lochinvar National Park è situato ai margini meridionali delle Kafue Flats. Il territorio dell'attuale Lochinvar National Park è stato acquistato dal Governo dello Zambia, assistito dal WWF nel 1968 e dichiarato parco nazionale nel 1972. Il Blue Lagoon National Park si trova a 100 km ad ovest di Lusaka, sul lato opposto rispetto al Lochinvar National Park e copre una superficie di 500 km².

La costruzione delle due dighe ha profondamente modificato il regime naturale del fiume ed ha influito notevolmente sulle Kafue Flats. La significativa variabilità delle piogge sul bacino imbrifero del Kafue comporta un andamento naturale variabile delle portate misurate a Hook Bridge (stazione di misura situata 60 km a monte del serbatoio di Itezhi-tezhi) (Fig. 1.5). A seguito della regolazione, le portate che



Figura 1.8: *Burgeranus carunculatus*.



Figura 1.9: *Kobus leche Kafuensis*.

fuoriescono dal serbatoio di Itezhi-tezhi sono più uniformi: alcuni picchi di piena sono attutiti e sono evitate le magre (Fig. 1.10).

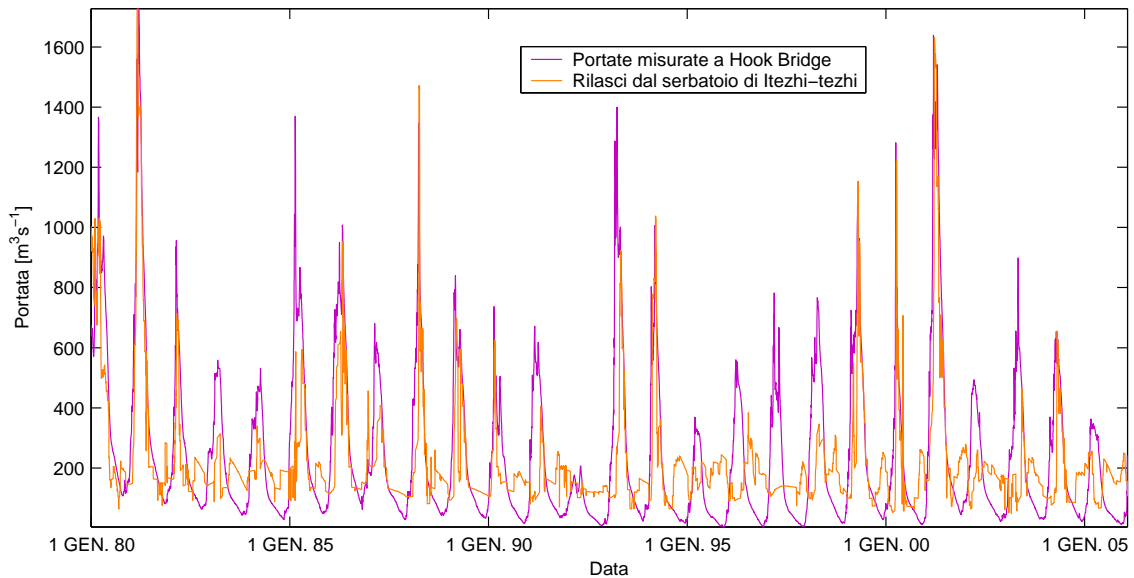


Figura 1.10: Portate misurate giornalmente a Hook Bridge e rilasci dal serbatoio di Itezhi-tezhi: gennaio 1980 - dicembre 2005.

Prima della costruzione della diga di Itezhi-tezhi, le inondazioni delle Kafue Flats seguivano un andamento stagionale, ora l'inondazione delle Kafue Flats è una caratteristica quasi permanente, poiché il rilascio supera la soglia di $170 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ di inondazione delle Kafue Flats tra ottobre e giugno. Il cambiamento delle condizioni ambientali prodotto dalla regolazione comporta rilevanti conseguenze sulla comunità biotica [38], in particolare la diffusione di specie invasive [43]. All'interno delle Kafue Flats si sono verificati il cambiamento dei caratteri ecologici [26] e la diffusione di una pianta aliena, la *Mimosa pigra* (Fig. 1.11), che ha sostituito la vegetazione originaria, impoverendo l'ecosistema e riducendo la biodiversità vegetale e animale. Questa modifica è accentuata dalla presenza del serbatoio di Kafue Gorge che, quando raggiunge livelli elevati, rigurgita e produce l'allagamento della zona orientale delle Kafue Flats [17].

Anche la fauna selvatica ha risentito della regolazione: le zone di pascolo e di riproduzione sono state perse a causa della ridotta variabilità stagionale delle inondazioni [41]. Nel 1931 vi erano 250 000 capi di *Kobus leche kafuensis* nelle Kafue Flats [37]; questo numero è diminuito notevolmente negli anni e si è assistito ad un declino della popolazione dell'85 %: nel 2005 erano presenti solamente circa 38 000



Figura 1.11: *Mimosa pigra*.

esemplari [11]. La causa principale di questo declino, secondo numerosi studi, pare attribuibile all'alterazione delle piene ad opera della regolazione delle dighe, poiché ha portato ad una negativa modificazione del comportamento riproduttivo e sociale [45], [46], [47], [40], [39], [48]. La situazione che si è creata ha influito anche sulla riproduzione e le migrazioni di varie specie di pesci [49].

La popolazione locale che pratica l'allevamento si lamenta per i livelli di acqua molto più costanti rispetto al passato, i quali non permettono la crescita del foraggio durante l'estate.

La minaccia a questa importante area ha richiamato l'attenzione del WWF [55], che ha iniziato un'attività di salvaguardia e sensibilizzazione delle popolazioni locali sin dagli anni Sessanta.

1.3 Studi effettuati sull'area

Per completare il quadro conoscitivo dell'area è necessario presentare brevemente i principali studi effettuati.

J.J.Burke [6] affronta i problemi inerenti alla gestione integrata dell'acqua del bacino del Kafue. Gli interessi all'interno di questo bacino sono molteplici: sfruttamento idroelettrico, uso dell'acqua per scopo irriguo e salvaguardia ambientale. Una gestione unilaterale del sistema accentua i conflitti esistenti: la gestione del bacino tramite un approccio ad un solo obiettivo è fallimentare ed è per questo che è necessario considerare molti obiettivi. L'autore, inoltre, pone l'accento sulla necessità di

un utilizzo più razionale delle risorse idriche del sottosuolo le quali, se ben gestite, potrebbero sopperire ad alcuni segmenti di domanda idrica, permettendo una più efficiente gestione delle risorse idriche superficiali.

M.P. McCartney e H.A. Houghton-Carr [31] analizzano le caratteristiche economiche dell'area bagnata dal fiume Kafue. Vi è una importante produzione idroelettrica, grazie alla centrale ai piedi di Kafue Gorge che permette di sfruttare un considerevole salto motore (400 m) ed è notevole la produzione di canna da zucchero. Gli autori propongono l'utilizzo del programma HYDRO-PC per simulare il sistema e valutare la gestione solamente dal punto di vista della produzione idroelettrica e dei coltivatori di canna da zucchero.

C.Munyati [34] descrive la metodologia utilizzata per valutare i cambiamenti ambientali avvenuti nelle Kafue Flats tramite tecniche di rilevamento remoto. Lo scopo di questo lavoro è l'analisi delle modificazioni avvenute nell'area umida a causa della diminuzione delle piogge, della costruzione delle dighe e delle derivazioni per usi antropici. Sono state utilizzate quattro immagini di anni diversi ma tutte del mese di settembre: 1984 (Landsat MSS), 1988 (Landsat MSS), 1991 (Landsat TM) e 1994 (Landsat TM). E' stato necessario provvedere a delle correzioni delle distorsioni dovute ai disturbi atmosferici (l'immagine di riferimento è quella del 1994) e riportate geometricamente su una mappa di proiezione comune. Ogni immagine è stata classificata separatamente nelle seguenti categorie: acqua, vegetazione verde densa, vegetazione verde sparsa, vegetazione verde molto sparsa e terra secca e bruciata. Per l'analisi dei cambiamenti durante l'arco temporale coperto dalle immagini, l'autore ha sovrapposto le immagini tramite un Geographic Information System (GIS). Lo studio evidenzia una riduzione dell'area coperta da vegetazione verde densa, nella zona più a monte delle Kafue Flats; questo fatto è probabilmente dovuto all'alterazione del naturale regime di piene e magre, indotto dalle dighe.

M. Mumba e J. R. Thompson [33] trattano i cambiamenti idrologici avvenuti nelle Kafue Flats, in seguito alla costruzione di due dighe realizzate per la produzione di energia idroelettrica: Kafue Gorge nel 1971 e Itezhi-tezhi nel 1978. Le paludi e le aree umide, che si trovano fra le due dighe, a differenza del passato, ora vengono inondate quasi permanentemente. Di conseguenza si sono verificati dei cambiamenti ecologici che riguardano anche i due parchi nazionali presenti, entrambi protetti dalle convenzioni di Ramsar. Il più notevole cambiamento nella vegetazione è la diffusione di una pianta aliena, la *Mimosa pigra* che ha colonizzato parte delle zone umide, sostituendo la vegetazione originaria e impoverendo l'ecosistema a causa della

riduzione della biodiversità vegetale e animale. La nuova situazione che si è creata ha inoltre influenzato lo stile di vita delle comunità pastorali che vivono lungo il fiume.

H. Sinyangwe e D. Stephenson [49] propongono l'utilizzo del modello RAFLS per la descrizione del sistema del Kafue. Con questo modello essi sostengono che è possibile valutare la gestione del serbatoio di Itezhi-tezhi e di quello di Kafue Gorge, per quanto riguarda le conseguenze ambientali.

1.4 Regolazione attuale dei due serbatoi

Attualmente il serbatoio di Itezhi-tezhi e quello di Kafue Gorge sono gestiti dalla ZESCO, la compagnia idroelettrica dello Zambia. Per entrambi i serbatoi sono state stabilite regole di livelli ottimali (*rule-curve*). Il regolatore deve, quindi, scaricare la quantità di acqua necessaria per avvicinarsi il più possibile al livello ottimale del serbatoio, imposto dalla regola stabilita al fine di massimizzare la produzione idroelettrica (Fig. 1.12), (Fig. 1.13).

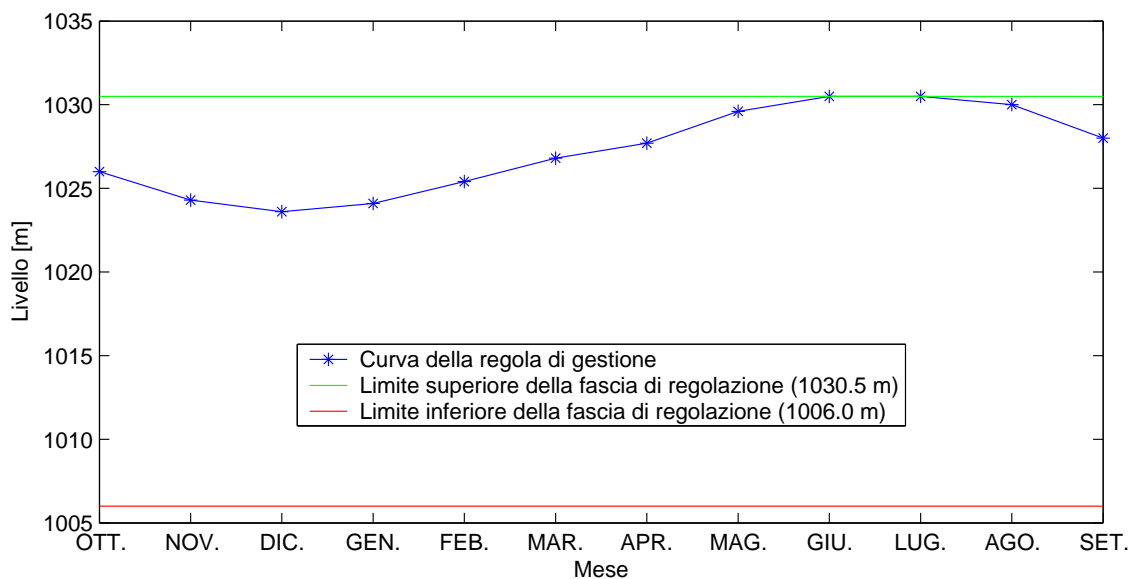


Figura 1.12: Regola di gestione per il serbatoio di Itezhi-tezhi.

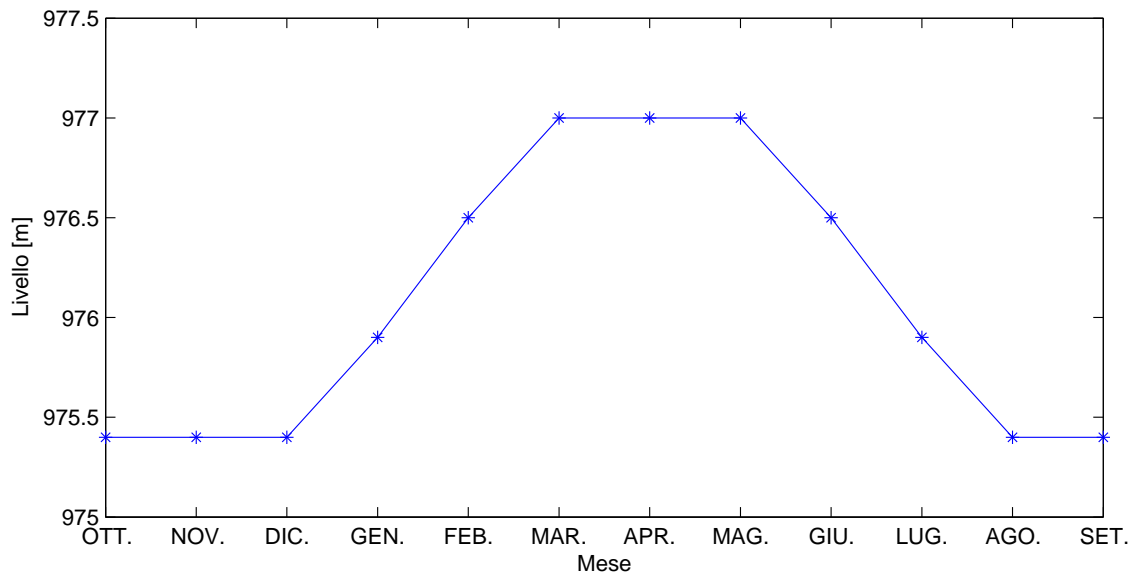


Figura 1.13: Regola di gestione per il serbatoio di Kafue Gorge.

1.5 Scopo della tesi

Lo scopo della presente tesi è il progetto della politica di regolazione giornaliera congiunta del serbatoio di Itezhi-tezhi e di Kafue Gorge in modo da integrare la necessità di produzione idroelettrica con la salvaguardia dell'ambiente delle Kafue Flats e la possibilità di praticare l'agricoltura di recessione. Un altro elemento di novità di questo lavoro è la modellizzazione delle Kafue Flats, tramite un serbatoio virtuale.

Capitolo 2

Criteri e indicatori

Il primo passo da compiere prima di affrontare la definizione degli indicatori è l'individuazione dei portatori di interesse. L'identificazione dei portatori di interesse e la stesura degli indicatori sono state eseguite alla luce delle informazioni riguardanti l'area, riportate nel Cap. 1.

I portatori di interesse nell'area studio sono i seguenti:

- ZESCO (Zambian Electricity Supply Company),
- ZSC (Zambia Sugar Company),
- agricoltori,
- piccoli agricoltori,
- WWF,
- parchi nazionali,
- pescatori.

Gruppi di portatori con interessi comuni costituiscono un settore (Tab. 2.1). Per ogni settore viene definito un criterio e la corrispondenza tra criterio e settore è biunivoca [50], di conseguenza è chiamato criterio di settore. Un criterio è un attributo, attraverso il quale si possono giudicare le prestazioni della politica di regolazione rispetto ad un settore. Non è un quantitativo e non esprime numericamente gli effetti della politica su un interesse. Si deve, quindi, introdurre un indice di settore: un funzionale delle traiettorie delle variabili idrologiche (livelli dei serbatoi

Portatore di interesse	Settore
ZESCO	Idroelettrico
ZSC e agricoltori	Canna da zucchero e soia
Piccoli agricoltori	Agricoltura di recessione
WWF	Kafue Flats
Parchi nazionali	Kafue Flats
Pescatori	Pesca

Tabella 2.1: Portatori di interesse e settori.

di Itezhi-tezhi, di Kafue Gorge e delle Kafue Flats, portate uscenti dagli sbarramenti di Itezhi-tezhi e Kafue Gorge, portate immesse nei canali di derivazione) che descrivono il sistema sotto l'effetto di una data politica di gestione. Le prestazioni di una politica sono così valutate tramite un vettore di indici di settore. E' molto complesso definire direttamente l'indice a partire dalle traiettorie, per questo motivo si definiscono criteri di secondo livello e eventualmente si dividono questi in criteri di livello inferiore fino a giungere a criteri ai quali si può facilmente associare una procedura di misura. Questi criteri sono detti criteri foglia e le procedure associate indicatori [50]. I criteri devono rispettare le seguenti proprietà [29]:

- *Completezza*: ad un dato livello gerarchico un insieme di criteri è completo se permette di valutare adeguatamente quanto i criteri del livello gerarchico superiore siano stati soddisfatti.
- *Operazionalità*: i criteri devono essere scelti in modo che la valutazione di un'alternativa sia facile e comprensibile per gli esperti e i portatori di interesse.
- *Scomponibilità*: i criteri devono permettere di valutare un'alternativa dal punto di vista di ogni portatore di interesse.
- *Non ridondanza*: uno stesso effetto non deve essere considerato due volte.
- *Misura minima*: il numero dei criteri deve essere il più contenuto possibile nel rispetto delle proprietà di completezza e di operazionalità.

Gli indicatori di ogni settore vengono illustrati in questo capitolo. Tutti gli indicatori scelti sono espressi come costi per passo, cioè ogni indicatore è un funzionale

esprimibile come somma di funzioni elementari calcolate in ciascun passo temporale [51]: tutti gli indicatori sono separabili (questa proprietà è fondamentale per l'ottimizzazione).

Il passo temporale utilizzato è il **passo giornaliero**: la giustificazione di questa scelta viene data nel Cap. 3.

D'ora in avanti si indica con t la variabile corrispondente al passo temporale, omettendo il suo insieme di definizione.

La simbologia utilizzata in questo capitolo fa riferimento allo schema concettuale presente nel Cap. 3 (Fig. 3.1).

2.1 Idroelettrico

Il criterio di questo settore è *la produzione di energia* e vengono attribuiti ad esso gli indicatori di seguito riportati (2.1) e (2.2); nell'ottimizzazione si considera un unico indicatore.

2.1.1 Itezhi-tezhi

$$i_{t+1}^{U1} = G_{t+1}^{U1} \quad (2.1)$$

dove:

- G_{t+1}^{U1} è l'energia prodotta dalla centrale di Itezhi-tezhi nell'intervallo $[t, t + 1)$, approfondita nel Par. 3.3.

2.1.2 Kafue Gorge

$$i_{t+1}^{U4} = G_{t+1}^{U4} \quad (2.2)$$

dove:

- G_{t+1}^{U4} è l'energia prodotta dalla centrale di Kafue Gorge nell'intervallo $[t, t + 1)$, approfondita nel Par. 3.9.

2.2 Canna da zucchero e soia

Il criterio per questo settore è *il profitto irriguo* che è legato al raccolto, tuttavia il raccolto non è facile da calcolare ed è preferibile sostituire il criterio con un altro sottocriterio: *il deficit di fornitura*. L'indicatore considerato è espresso nella (2.3):

$$i_{t+1}^{U3} = (w_t^{U3} - q_{t+1}^{U3})^+ \quad (2.3)$$

dove:

- w_t^{U3} è la domanda irrigua;
- q_{t+1}^{U3} è la portata che giunge al distretto irriguo.

2.2.1 Stima della domanda irrigua

La stima della domanda irrigua è stata eseguita tramite il programma CROPWAT [14], [16]. CROPWAT è un programma della FAO che permette di calcolare l'irrigazione necessaria per una determinata coltura inserendo i dati meteorologici relativi ad un'area (Tab. 2.2). I dati meteorologici sono ricavati tramite il program-

Grandezza	Unità di misura
Temperatura minima	°C
Temperatura massima	°C
Umidità	%
Velocità del vento	km/giorno
Ore di luce	h
Radiazione luminosa	MJ/m ² /giorno
Evapotraspirazione	mm/giorno
Pioggia	mm
Pioggia effettiva	mm

Tabella 2.2: Dati necessari per CROPWAT.

ma CLIMWAT [15], che consiste in una base di dati meteorologici relativi a molte stazioni; Kafue Polder è la stazione di riferimento per l'area di studio. La stazione si trova a 978 m sul livello del mare e ha le coordinate: 15,76°S e 27,91°E (Fig. 2.1).

Oltre ai dati idrometeorologici necessari (Fig. 2.2) si devono inserire:

- il tipo di coltivazione: nel nostro caso la canna da zucchero e la soia si estendono

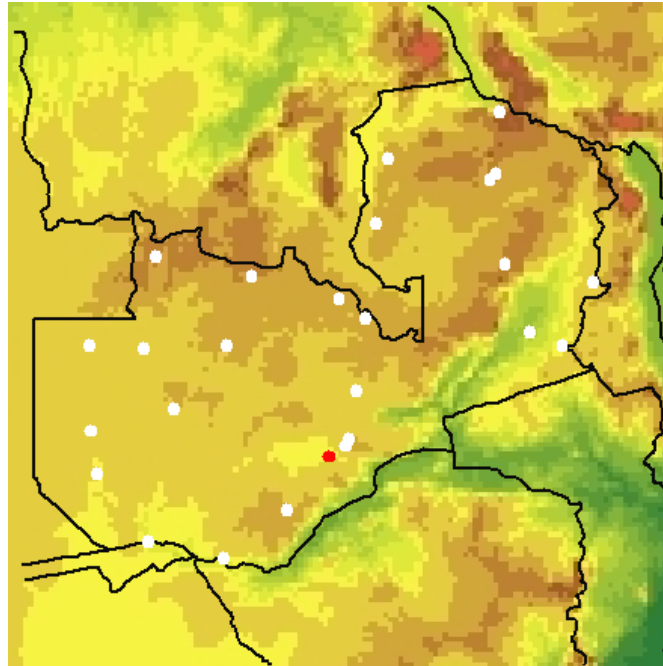


Figura 2.1: Kafue Polder è evidenziato in rosso.

per il 96,88 % dell'area totale agricola, quindi la stima della domanda è eseguita su queste due coltivazioni;

- la tipologia di suolo: argilla [6];
- la data di semina: 1 dicembre (nelle zone tropicali la semina avviene nel picco della stagione delle piogge).

Il programma permette di calcolare l'irrigazione necessaria che sommata alla pioggia è in grado di bilanciare l'evapotraspirazione (Fig. 2.3), (Fig. 2.4) in mm/decade per la coltivazione di canna da zucchero e di soia. Una irrigazione giornaliera che contrasti completamente l'evapotraspirazione non è fattibile dal punto di vista economico; il software fornisce i valori di irrigazione (Fig. 2.5), (Fig. 2.6) fondamentali per far sì che la pianta non incorra in uno stress idrico.

Tra le proprietà del terreno vi è la TAM (total available moisture), un parametro che quantifica l'acqua disponibile nel terreno ed è uguale alla differenza tra la field capacity (FC) ed il wilting point (WP). La field capacity (capacità di campo) è la massima quantità di acqua che il terreno è in grado di contenere vincendo la forza di gravità e dipende dalla tessitura di terreno: i terreni argillosi hanno una FC elevata, poiché gli spazi tra gli strati dell'argilla favoriscono l'adsorbimento di acqua. Il wilting point (punto di appassimento) rappresenta la quantità di umidità al di sotto della

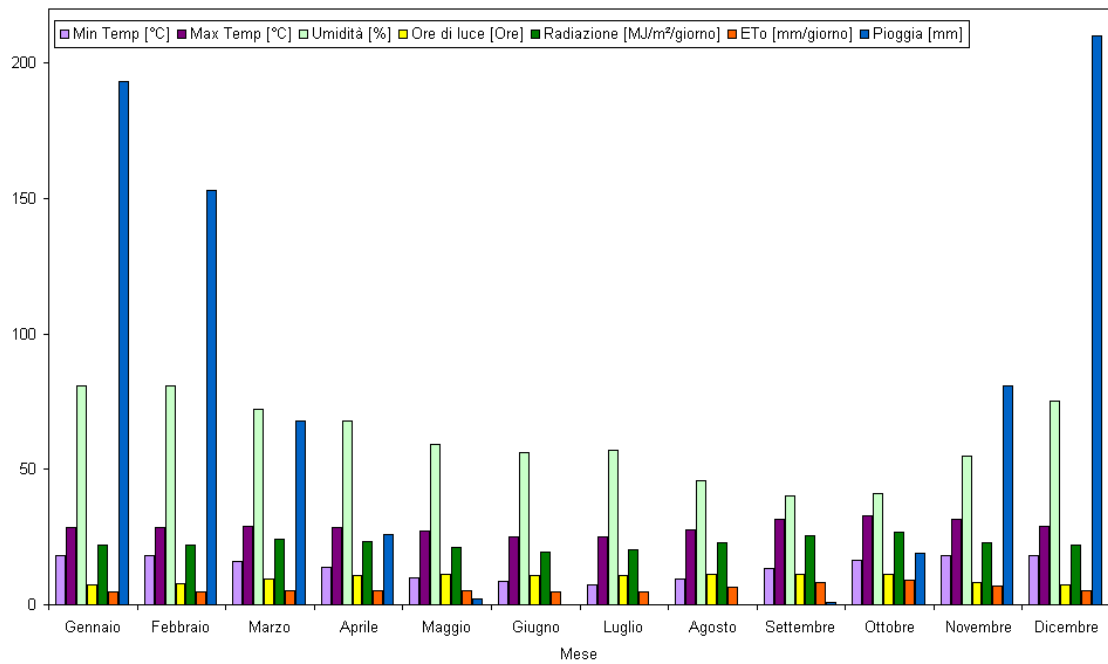


Figura 2.2: Dati idrometeorologici provenienti da CLIMWAT.

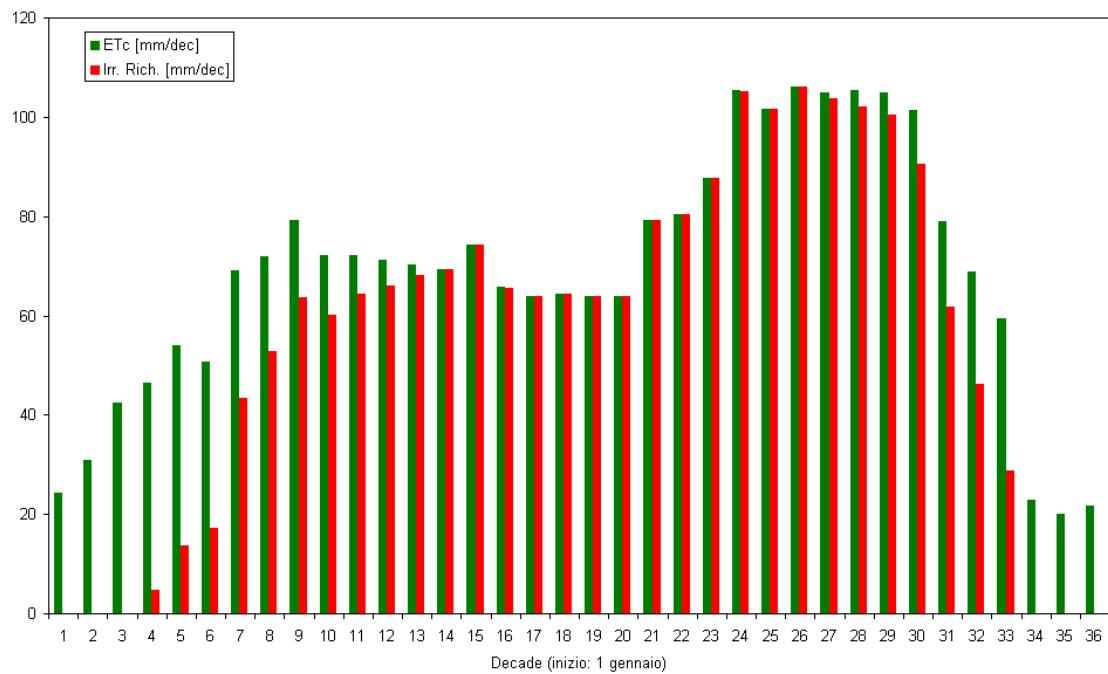


Figura 2.3: Irrigazione richiesta per la canna da zucchero ed evapotraspirazione.

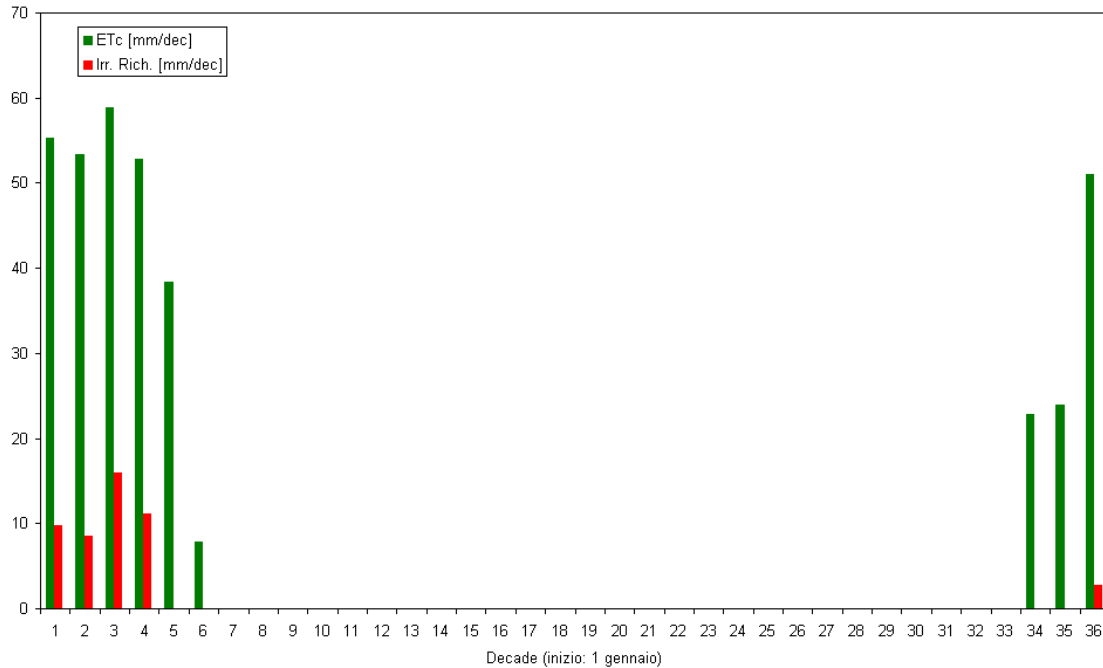


Figura 2.4: Irrigazione richiesta per la soia ed evapotraspirazione (l'assenza di barre indica che la raccolta della soia è avvenuta e non è più presente la coltivazione).

quale la pianta subisce condizioni di stress idrico. La quota della TAM che è captabile dalla pianta prende il nome di RAM (ready available moisture); essa dipende non solo dal tipo di terreno ma anche dal tipo di coltivazione praticata. Scopo dell'irrigazione è, quindi, la fornitura di acqua, tale da poter essere immagazzinata nel suolo in modo che fino al seguente evento irriguo non si verificano situazioni di stress idrico (Fig. 2.7), (Fig. 2.8).

La domanda irrigua è data dalla sommatoria rispetto alla canna da zucchero e alla soia del prodotto della portata irrigua stimata in l/s/ha (Fig. 2.5), (Fig. 2.6) e l'area della coltivazione (Fig. 2.9):

- area soia: 1275 ha;
- area canna da zucchero: 26 640 ha.

CROP IRRIGATION SCHEDULE

ETo station: KAFUE-POLDER Crop: Sugarcane (Ratoon) Planting date: 01/12
 Rain station: KAFUE-POLDER Soil: RED LOAMY Harvest date: 30/11

Yield red.: 0.0 %

Crop scheduling options

Timing: Irrigate at 100 % depletion
 Application: Refill to 100 % of field capacity
 Field eff. 70 %

Table format: Irrigation schedule

Date	Day	Stage	Rain mm	Ks fract.	Eta %	Depl %	Net Irr	IrrDeficit	Loss	Gr. Irr	Flow
							mm	mm	mm	mm	l/s/ha
31 Mar	121	Mid	0.0	1.00	100	67	181.6	0.0	0.0	259.4	0.25
29 Apr	150	Mid	0.0	1.00	100	68	182.3	0.0	0.0	260.5	1.04
25 May	176	Mid	0.0	1.00	100	66	178.5	0.0	0.0	254.9	1.13
21 Jun	203	Mid	0.0	1.00	100	65	176.6	0.0	0.0	252.2	1.08
19 Jul	231	Mid	0.0	1.00	100	67	179.6	0.0	0.0	256.6	1.06
12 Aug	255	Mid	0.0	1.00	100	68	183.3	0.0	0.0	261.9	1.26
1 Sep	275	End	0.0	1.00	100	69	185.5	0.0	0.0	265.0	1.53
18 Sep	292	End	0.0	1.00	100	65	176.3	0.0	0.0	251.9	1.72
5 Oct	309	End	0.0	1.00	100	65	176.1	0.0	0.0	251.6	1.71
24 Oct	328	End	0.0	1.00	100	68	182.8	0.0	0.0	261.1	1.59
22 Nov	357	End	0.0	1.00	100	65	176.5	0.0	0.0	252.1	1.01
30 Nov	End	End	0.0	1.00	0	8					

Totals:

Total gross irrigation	2827.3 mm	Total rainfall	753.6 mm
Total net irrigation	1979.1 mm	Effective rainfall	462.1 mm
Total irrigation losses	0.0 mm	Total rain loss	291.5 mm
Actual water use by crop	2463.2 mm	Moist deficit at harvest	22.0 mm
Potential water use by crop	2463.2 mm	Actual irrigation requirement	2001. mm
Efficiency irrigation schedule	100.0 %	Efficiency rain	61.3 %
Deficiency irrigation schedule	0.0 %		

Yield reductions:

Stagelabel	A	B	C	D	Season	
Reductions in ETc	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	%
Yield response factor	0.50	0.75	1.20	0.10	1.20	
Yield reduction	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	%
Cumulative yield reduction	0.0	0.0	0.0	0.0		%

Figura 2.5: Scheda di irrigazione della canna da zucchero.

CROP IRRIGATION SCHEDULE

ETo station: KAFUE-POLDER Crop: Soybean Planting date: 01/12
 Rain station: KAFUE-POLDER Soil: BLACK CLAY SOIL Harvest date: 23/02

Yield red.: 0.0 %

Crop scheduling options

Timing: Irrigate at 100 % depletion
 Application: Refill to 100 % of field capacity
 Field eff. 70 %

Table format: Irrigation schedule

Date	Day	Stage	Rain mm	Ks fract.	Eta %	Depl %	Net Irr mm	IrrDeficit mm	Loss mm	Gr. Irr mm	Flow l/s/ha
1 Dec	1	Init	0.0	1.00	100	54	34.7	0.0	0.0	49.6	5.74
23 Feb	End	End	0.0	1.00	0	0					

Totals:

Total gross irrigation	49.6 mm	Total rainfall	534.2 mm
Total net irrigation	34.7 mm	Effective rainfall	433.4 mm
Total irrigation losses	0.0 mm	Total rain loss	100.8 mm
Actual water use by crop	361.6 mm	Moist deficit at harvest	0.0 mm
Potential water use by crop	361.6 mm	Actual irrigation requirement	-71.8 mm
Efficiency irrigation schedule	100.0 %	Efficiency rain	81.1 %
Deficiency irrigation schedule	0.0 %		

Yield reductions:

Stagelabel	A	B	C	D	Season
Reductions in ETc	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 %
Yield response factor	0.40	0.80	1.00	0.40	0.85
Yield reduction	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 %
Cumulative yield reduction	0.0	0.0	0.0	0.0	%

Figura 2.6: Scheda di irrigazione della soia.

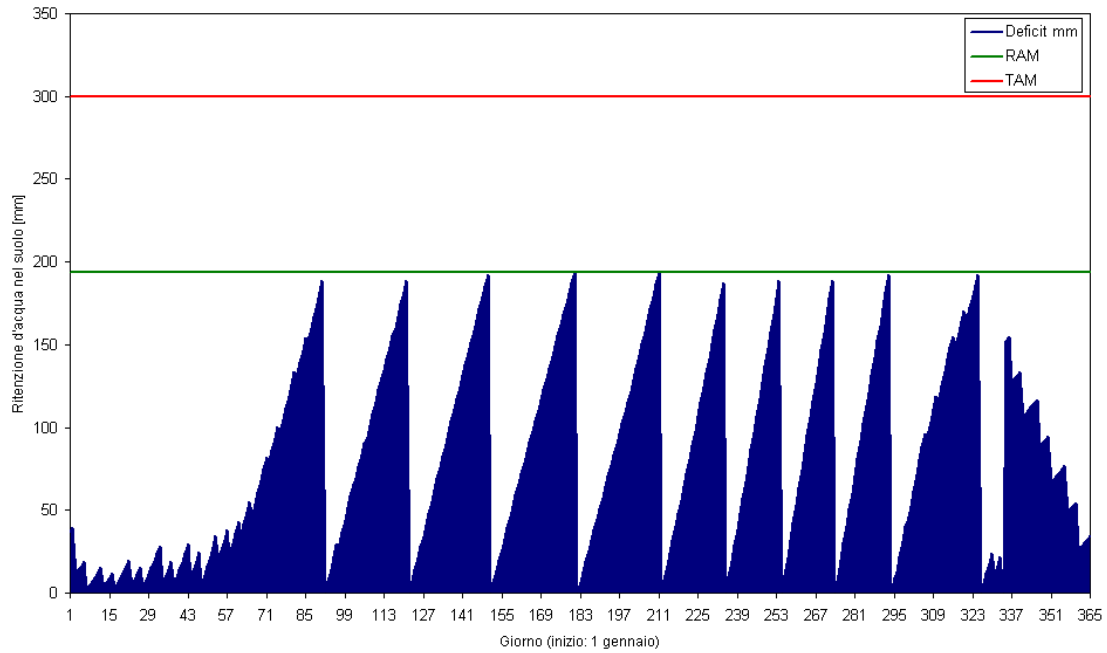


Figura 2.7: Grafico della diminuzione dell'umidità del suolo in funzione del tempo per la canna da zucchero.

2.3 Agricoltura di recessione

Questo settore ha come criterio *il profitto degli agricoltori* che si dedicano a questo tipo di agricoltura; il profitto si verifica quando essi possono effettivamente praticare l'agricoltura di recessione: è necessario che le acque della zona umida si ritirino lasciando terreno fertile da poter coltivare (condizione naturale) [49]. L'indicatore proposto esprime lo scostamento della superficie allagata delle Kafue Flats rispetto alla superficie che si sarebbe avuta in assenza delle dighe.

$$i_{t+1}^{recess} = [S^{R2}(s_{t+1}^{R2}) - S^{R2}(s_{t+1}^{R2nat})]^2 \quad (2.4)$$

dove:

- $S^{R2}(s_{t+1}^{R2})$ è la superficie allagata delle Kafue Flats;
- $S^{R2}(s_{t+1}^{R2nat})$ è la superficie allagata delle Kafue Flats in assenza delle dighe.

Le superfici sono funzioni del volume disponibile nel serbatoio virtuale che descrive le Kafue Flats (vedi Par. 3.6.2).

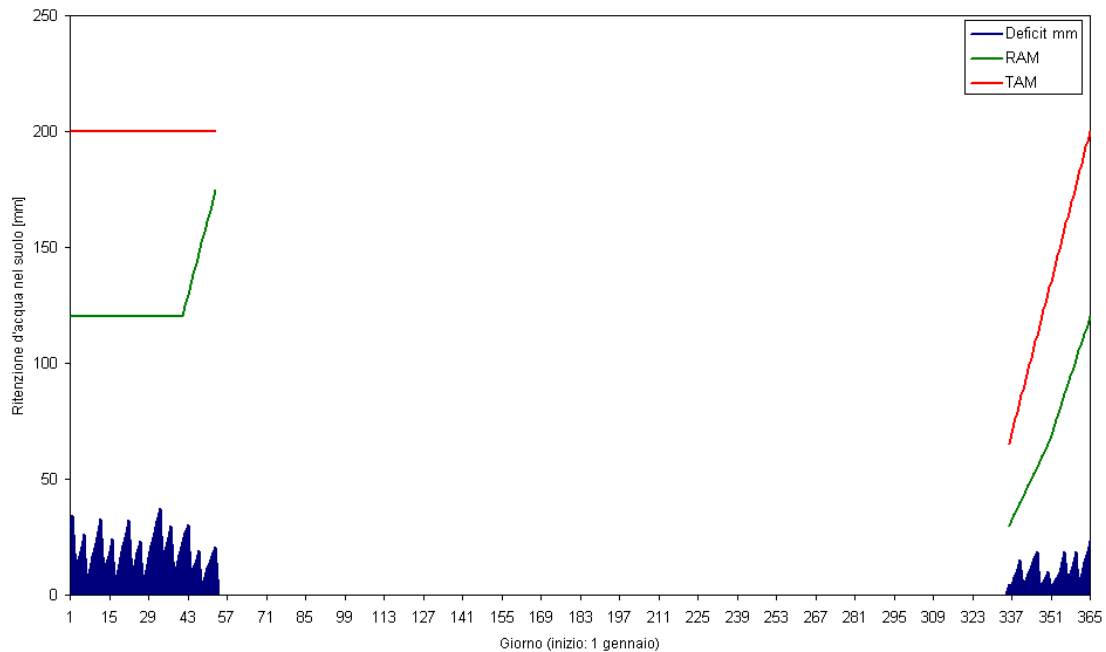


Figura 2.8: Grafico della diminuzione dell'umidità del suolo in funzione del tempo per la soia (l'assenza di curve indica che la raccolta della soia è avvenuta e non è più presente la coltivazione).

2.4 Kafue Flats

Il criterio del settore Kafue Flats è *la qualità dell'ambiente* che viene diviso nei criteri foglia che considerano *la condizione dell'ecosistema e della biodiversità, l'habitat dell'avifauna e l'alimentazione, la riproduzione e le migrazioni dei pesci*.

Per quanto riguarda l'ecosistema nel suo complesso e la biodiversità la migliore condizione è il regime naturale del sistema caratterizzato dalle variazioni stagionali [33], [49], infatti a causa del livello quasi costante dell'area allagata si assiste alla diffusione di una pianta, la *Mimosa pigra*, che ha sostituito alcune specie arboree tradizionalmente presenti nell'area, come l'*Echinochloa stagnina* e l'*Oryza longistaminata* [33]. Anche le specie animali hanno risentito negativamente del cambiamento dal regime naturale a quello regolato [41], [25].

Dalle simulazioni del modello Kafriba [56], sviluppato dalla Zesco per descrivere l'inondazione delle Kafue Flats, si notano due distinti fenomeni di allagamento dell'area umida (Fig. 2.10):

- allagamento immediatamente a valle del serbatoio di Itezhi-tezhi (dipendente solamente dai rilasci dal serbatoio di Itezhi-tezhi);

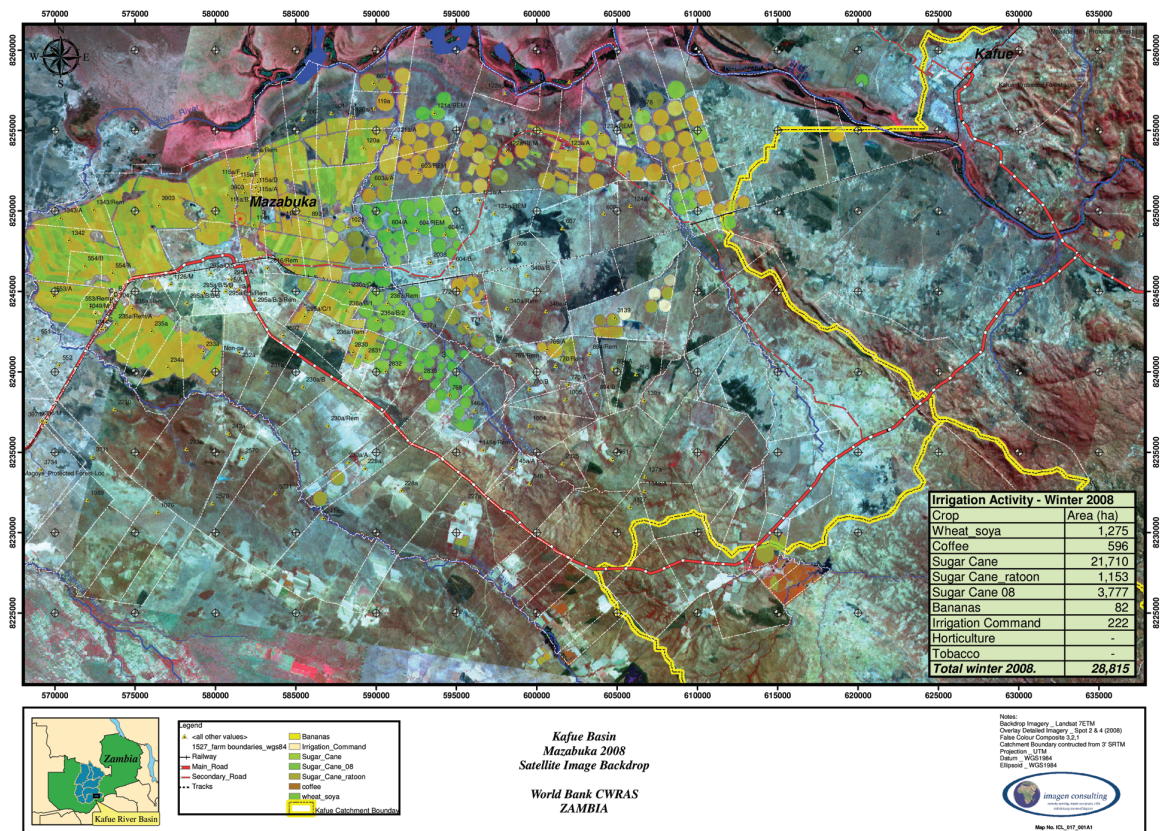


Figura 2.9: Coltivazioni nelle Kafue Flats.

- allagamento immediatamente a monte del serbatoio di Kafue Gorge (dipendente dai rilasci del serbatoio di Itezhi-tezhi e dal fenomeno del rigurgito di Kafue Gorge).

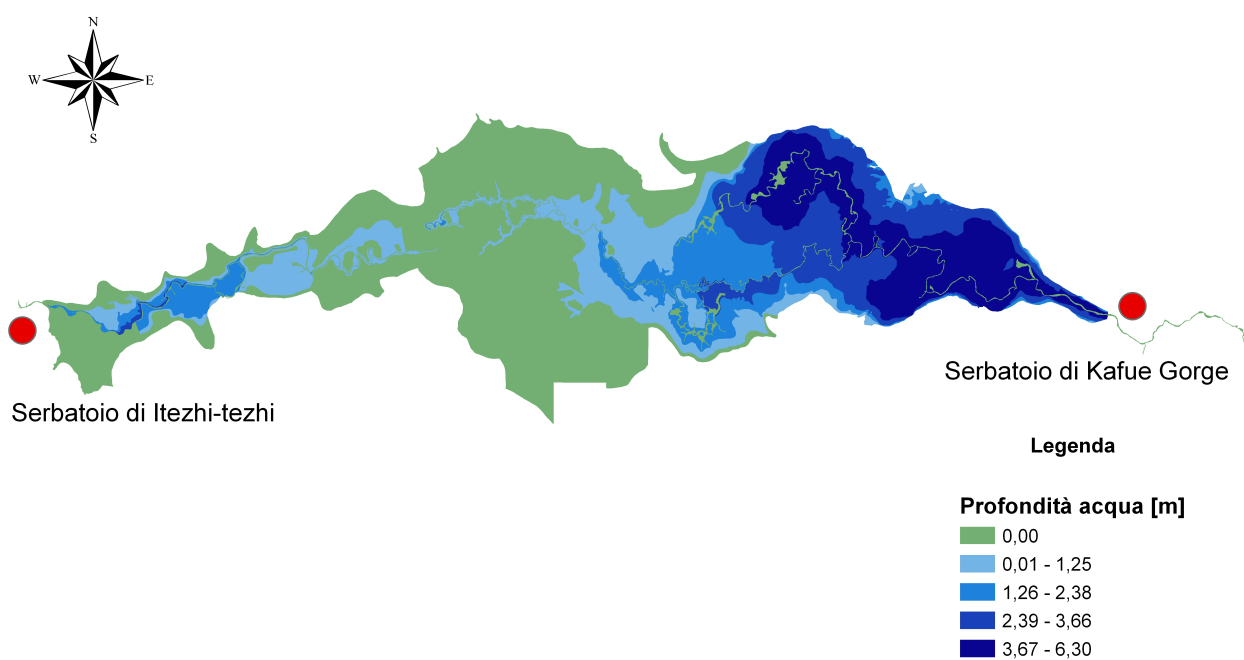


Figura 2.10: Area inondata delle Kafue Flats (simulazione KAFRIBA, 5 dicembre 2003; elaborazione ArcGIS 9.2).

L'indicatore, che tiene conto dell'allagamento immediatamente a valle del serbatoio di Itezhi-tezhi [34], misura lo scostamento dei rilasci dal regime naturale, cioè dagli afflussi misurati a Hook Bridge, che sarebbero le portate a valle di Itezhi-tezhi se non fosse stata costruita la diga. In questo modo si evita di introdurre un ulteriore componente dinamico nel modello con notevole risparmio sui tempi di calcolo.

L'indicatore è espresso dalla (2.5).

$$i_{t+1}^{U2} = \delta_t (r_{t+1}^{R1} - a_{t+1}^1)^2 \quad (2.5)$$

dove:

- r_{t+1}^{R1} è il rilascio dal serbatoio di Itezhi-tezhi nell'intervallo $[t, t + 1)$;
- a_{t+1}^1 è la portata misurata a Hook Bridge;
- δ è un parametro tempo variante che permette di tener conto delle indicazioni sul DMV dal serbatoio di Itezhi-tezhi (valore del DMV pari a $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nel mese di marzo e pari a $25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ in tutti gli altri mesi) che vale 1 nel mese di marzo e $1/12$ in tutti gli altri mesi.

L'indicatore (2.6) considera l'allagamento immediatamente a monte del serbatoio di Kafue Gorge ed è lo stesso della (2.4): rileva lo scostamento dell'area allagata in presenza di regolazione con l'area che ci sarebbe stata in assenza della regolazione.

$$i_{t+1}^{KF1} = [S^{R2}(s_{t+1}^{R2}) - S^{R2}(s_{t+1}^{R2nat})]^2 \quad (2.6)$$

dove:

- $S^{R2}(s_{t+1}^{R2})$ è la superficie allagata delle Kafue Flats, la quale è funzione del volume;
- $S^{R2}(s_{t+1}^{R2nat})$ è la superficie allagata delle Kafue Flats, in assenza delle dighe.

Le superfici sono funzioni del volume disponibile nel serbatoio virtuale che descrive le Kafue Flats (vedi Par. 3.6.2).

Essendo la superficie allagata un'area umida di notevole pregio ambientale ed essendo tutelata dal trattato di Ramsar, essa costituisce un habitat importante per l'avifauna: maggiore è la superficie allagata, maggiore è la possibilità di nidificazione dell'avifauna. L'indicatore (2.7) aumenta all'aumentare dell'area umida con esponente 0.5 (Fig. 2.11), infatti sono più significativi gli aumenti quando siamo in presenza di aree con poca estensione.

$$i_{t+1}^{KF2} = f(S^{R2}(s_{t+1}^{R2})) \quad (2.7)$$

dove:

$S^{R2}(s_{t+1}^{R2})$ è la superficie allagata delle Kafue Flats, la quale è funzione del volume.

Le Kafue Flats sono importanti anche per la fauna ittica; quando il fiume eson-

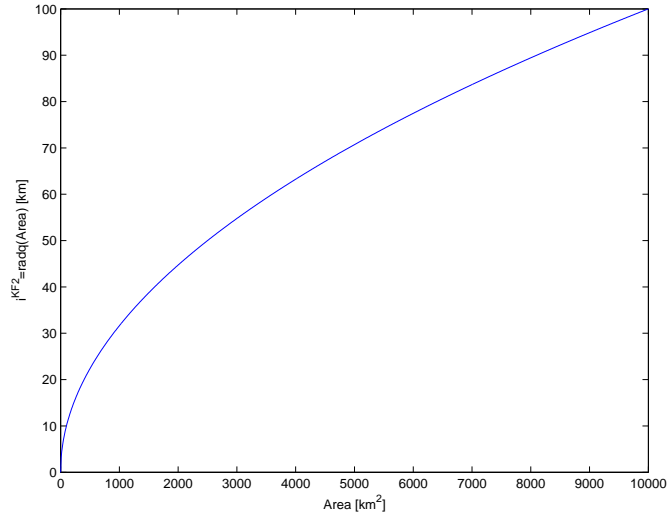


Figura 2.11: Indicatore i^{KF2} .

da allagando le Flats molti pesci presenti fuoriescono dall'alveo. Le principali specie di pesci delle Kafue Flats sono [22]:

- *Oreochromis andersonii*,
- *Clarias gariepinus*,
- *Alestes lateralis*.

Quando l'acqua si ritira i pesci rimangono nelle pozze e nelle lagune fino all'arrivo della successiva stagione delle piogge [32], [21].

Relativamente alla alimentazione, riproduzione e migrazione dei pesci si ritiene che le condizioni di allagamento favoriscono i pesci riguardo alla ricerca di nutrienti, alla riproduzione e ai flussi migratori [49]. Per questo motivo occorre fissare una soglia, al di sopra della quale l'allagamento è significativo per i pesci. L'indicatore (2.8) è dato dalla differenza tra il livello delle Kafue Flats e la soglia considerata.

$$i_{t+1}^{KF3} = [h^{R2}(s_{t+1}^{R2}) - h^{rif}]^+ \quad (2.8)$$

dove:

- $h^{R2}(s_{t+1}^{R2})$ è il livello della superficie allagata delle Kafue Flats;
- h^{rif} è il livello di riferimento, oltre il quale i pesci possono nutrirsi, riprodursi e migrare senza difficoltà, considerato pari a 979 m.

E' importante considerare anche i giorni consecutivi di allagamento, infatti i pesci

per alimentarsi, riprodursi e migrare necessitano di un periodo sufficientemente lungo di inondazioni: l'indicatore (2.9) esprime il massimo numero dei giorni consecutivi caratterizzati dal superamento del livello di riferimento che compare nella (2.8), sull'orizzonte temporale considerato.

$$i_{t+1}^{KF4} = \max\{i_t^{KF4}, I_{t+1}\} \text{ con } i_1^{KF4} = 0 \quad (2.9a)$$

$$I_{t+1} = \begin{cases} I_t + 1 & \text{se } h^{R2}(s_{t+1}^{R2}) \geq h^{rif} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2.9b)$$

dove:

- $h^{R2}(s_{t+1}^{R2})$ è la superficie allagata delle Kafue Flats;
- h^{rif} è il livello di riferimento, oltre il quale i pesci possono nutrirsi, riprodursi e migrare senza difficoltà, considerato pari a 979 m.

Il settore Pesca non è stato considerato poichè il criterio è il profitto dei pescatori, che è difficile da esprimere; si può utilizzare il criterio foglia dell'abbondanza dei pesci, espresso dagli indicatori (2.8), (2.9) considerati nel settore Kafue Flats.

Capitolo 3

Modello

Lo scopo del modello è di riprodurre le relazioni esistenti tra le variabili di controllo e le variabili idrologiche che compaiono negli indicatori. Il primo passo da compiere per identificare il modello è l'analisi dello schema topologico (Fig. 3.1): il sistema è sempre un aggregato di modelli più semplici che sono detti componenti. Lo schema logico differisce dalla realtà, poichè introduce elementi che non esistono realmente ma che sono utili dal punto di vista del modello: ad esempio le Kafue Flats, che sono una vasta area acquitrinosa, sono schematizzate come un serbatoio alimentato da un canale fittizio collegato al fiume a Kasaka (Fig. 3.1).

I componenti che compaiono in Fig. 3.1 sono i seguenti, ordinati seguendo il corso del fiume:

- bacino di Itezhi-tezhi [$C1$],
- serbatoio di Itezhi-tezhi [$R1$],
- centrale idroelettrica di Itezhi-tezhi [$U1$],
- canale [S],
- bacino delle Kafue Flats [$C2$],
- serbatoio delle Kafue Flats [$R2$],
- traversa irrigua [$U3$],
- serbatoio di Kafue Gorge [$R3$],
- centrale idroelettrica di Kafue Gorge [$U4$].

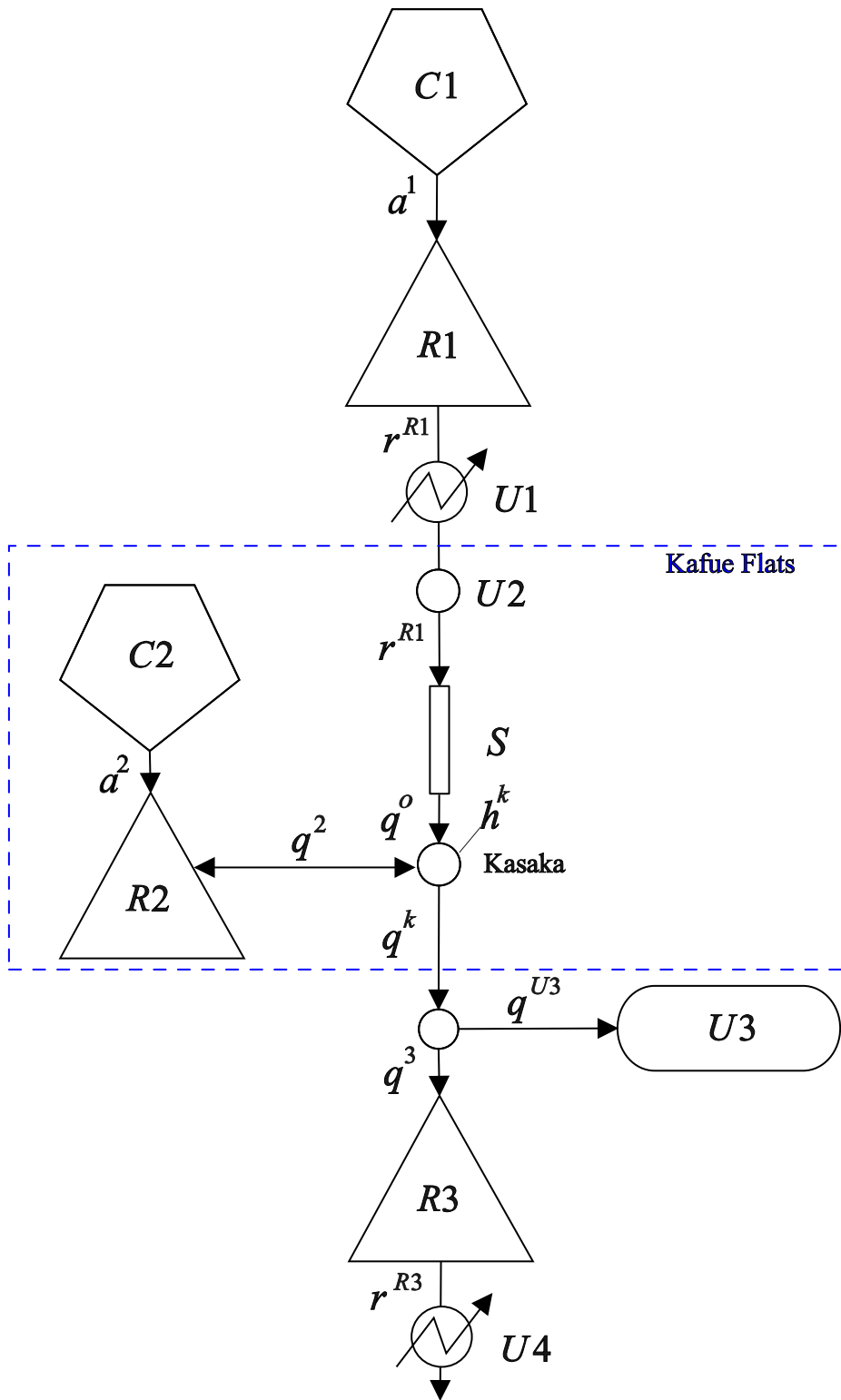


Figura 3.1: Schema topologico del sistema.

E' necessario per ogni componente identificare il modello che lo descriva adeguatamente, tranne per il bacino imbrifero di Itezhi-tezhi e quello delle Kafue Flats, per i quali si adotta un approccio *model free*.

Una scelta delicata riguarda il passo temporale; esso, infatti, deve rispondere a due necessità [51]: essere abbastanza breve da permettere il tempestivo adeguamento della decisione alle variazioni del sistema (rappresentabilità del sistema fisico) ed essere abbastanza lungo da consentire che tutti i fenomeni fisici ed economici che la decisione influenza si adattino ad essa (accettabilità sociale delle alternative). Il passo ottimale è quello giornaliero, poiché tutti i dati forniti sono stati raccolti giornalmente, inoltre permette di prendere decisioni tempestive in caso di piene e magre inaspettate. Per questi motivi si è adottato nella stesura dei modelli un **passo temporale giornaliero**. Nell'ottimizzazione, invece, si è optato per una aggregazione decadica: in questo modo è stato possibile ridurre notevolmente i tempi di calcolo. Abbiamo ottenuto, quindi, una politica ottima a passo decadico, che può essere simulata in due diversi modi:

- simulazione del sistema a passo giornaliero, ma mantenendo invariata la decisione di rilascio per tutta la decade;
- simulazione del sistema a passo giornaliero con decisioni di rilascio prese giornalmente, ottenute interrogando la politica ottima decadica.

Abbiamo sfruttato la proprietà di approssimazione continua dell'algoritmo di ottimizzazione (vedi Cap. 4) per simulare il sistema assumendo decisioni di rilascio giornaliere. I risultati mostrati nel Cap. 5 indicano che con decisioni di rilascio giornaliere le prestazioni del sistema migliorano rispetto a quelle che si avrebbero con decisioni di rilascio decadiche.

3.1 Bacino di Itezhi-tezhi

I dati disponibili sono una serie storica di portate giornaliere misurate a Hook Bridge (Tab. 3.1).

Non viene utilizzato un modello meccanicistico per rappresentare il bacino imbrifero (C1 in Fig. 3.1), poiché l'approccio per risolvere il problema di controllo è *model free*, che non necessita di un modello per il bacino imbrifero ma utilizza la serie storica dei dati di afflusso al bacino di Itezhi-tezhi. Questo approccio evita

Stazione di misura	Posizione	Periodo della serie storica
Hook Bridge	Circa 60 km a monte della diga di Itezhi-tezhi	1 ottobre 1973 - 25 novembre 2008

Tabella 3.1: Stazione di misura delle portate di Hook Bridge con localizzazione e intervallo temporale della misura.

l'identificazione del modello e diminuisce le approssimazioni e il rischio di eventuali errori che possono verificarsi durante l'operazione; è possibile, inoltre, utilizzare tutte le informazioni che giungono dalla serie originale.

La Fig. 3.2 mostra la notevole variabilità stagionale delle portate entranti nel serbatoio di Itezhi-tezhi. Il massimo valore misurato è pari a $2629 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e si è verificato il 7 aprile del 1978; il minimo della serie è $4.37 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ registrato il 17 novembre 1995. La media è pari a $293 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e la varianza è di $114\,127 (\text{m}^3\text{s}^{-1})^2$. I

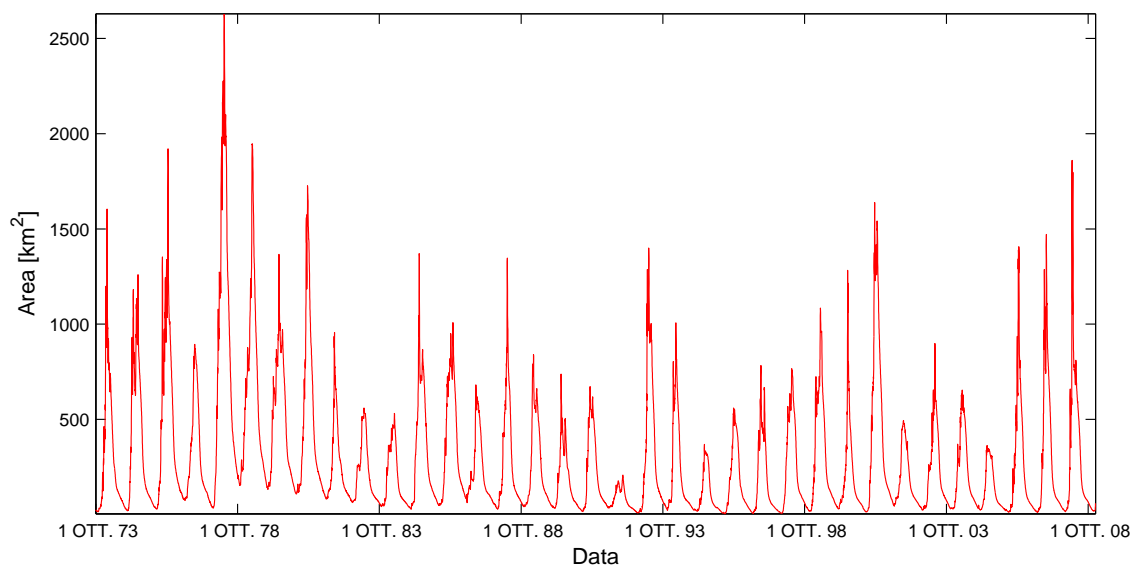


Figura 3.2: Dati giornalieri di portata del fiume Kafue misurati a Hook Bridge: 1 ottobre 1973 - 25 novembre 2008.

valori più elevati si registrano nella stagione delle piogge: dicembre-aprile, mentre i valori più bassi nella stagione calda e secca: settembre-novembre. Il picco della stagione delle piogge (dicembre-gennaio-febbraio) corrisponde anche al picco delle portate.

3.2 Serbatoio di Itezhi-tezhi

Il serbatoio di Itezhi-tezhi ($R1$ in Fig. 3.1) si trova a 450 km a monte del serbatoio di Kafue Gorge [20]; è stato costruito dal 1974 al 1978 con la funzione di regolare la portata entrante a Kafue Gorge. E' stata studiata la possibilità della costruzione di una centrale idroelettrica ai piedi di Itezhi-tezhi [23]. La diga è alta 65 m ed è in grado di immagazzinare un volume massimo, pari a 6000 milioni di m^3 ; essa è costituita da uno sbarramento in terra con un nucleo centrale impermeabile [33].

La transizione di stato del serbatoio di Itezhi-tezhi è il seguente bilancio di massa:

$$s_{t+1}^{R1} = s_t^{R1} + a_{t+1}^1 - e_{t+1}^{R1} S^{R1}(s_t^{R1}) - r_{t+1}^{R1} S^{R1}(s_t^{R1}) \quad (3.1a)$$

$$r_{t+1}^{R1} = R^{R1}(s_t^{R1}, u_t^{R1}, e_{t+1}^{R1}, a_{t+1}^1) \quad (3.1b)$$

$$S_t^{R1} = S^{R1}(s_t^{R1}) \quad (3.1c)$$

dove:

- s_t^{R1} è l'invaso al tempo t ;
- a_{t+1}^1 è il volume entrante nel serbatoio e r_{t+1}^{R1} è quello rilasciato: entrambi si riferiscono all'intervallo temporale $[t, t + 1)$;
- e_{t+1}^{R1} è l'evaporazione espressa in metri;
- S^{R1} è la superficie del serbatoio, funzione dell'invaso.

Afflussi al serbatoio sono considerate le portate misurate a Hook Bridge, ipotizzando che le dimensioni del lago rendano trascurabili i tempi di propagazione delle portate di afflusso rispetto al passo giornaliero utilizzato [42].

3.2.1 Livelli

E' disponibile una serie storica di livelli misurati sul livello medio del mare, che vanno dal 1 ottobre 1979 al 30 settembre 2006, essi sono misurati giornalmente (Fig. 3.3); lo zero è pari al livello medio del mare.

Il massimo valore di livello del serbatoio verificatosi nel periodo 1 ottobre 1979 - 30 settembre 2006 è pari a 1030.63 m (25-26-27-28 giugno 2001), il minimo a 1010.02 m (4 gennaio 1996) e il valore medio è 1026.02 m.

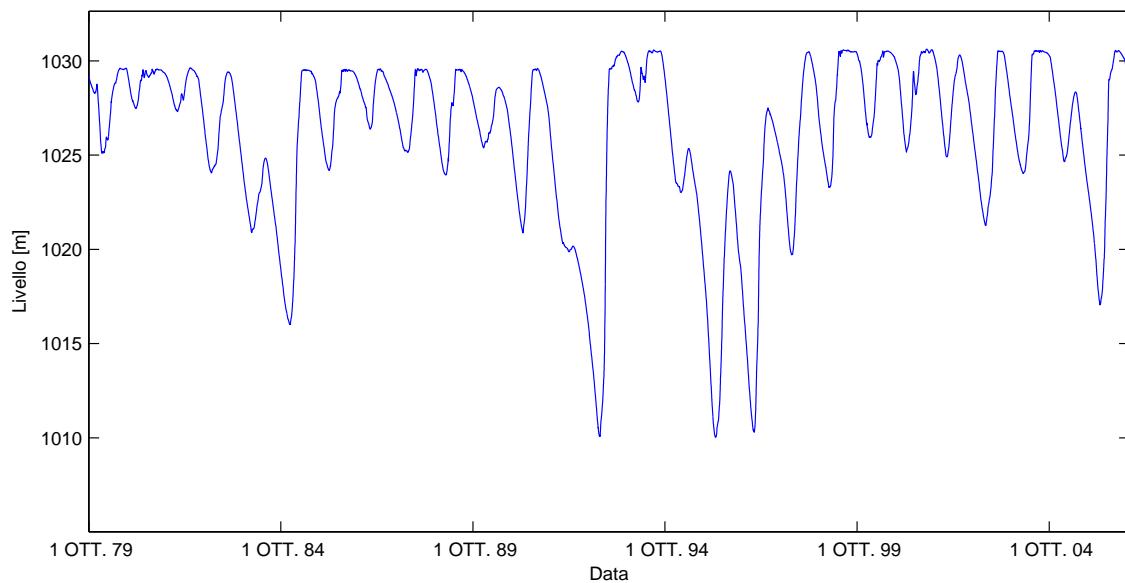


Figura 3.3: Livelli giornalieri del serbatoio di Itezhi-tezhi: 1 ottobre 1979 - 30 settembre 2006.

3.2.2 Evaporazione

L'evaporazione riguardante il serbatoio di Itezhi-tezhi è stata calcolata giornalmente in un contenitore che consente di misurare i millimetri di acqua evaporata ("pan evaporation"). L'evaporazione così misurata non è l'evaporazione netta, poiché viene considerato il contributo della pioggia ed è per questo motivo che sono ammessi valori negativi (Fig. 3.4). Il valore medio di evaporazione calcolato dal 1 ottobre 1979 al 30 settembre 2006 è pari a 4.57 mm: l'evaporazione prevale sulla pioggia. Gli estremi della serie sono i seguenti:

- valore massimo: 26.67 mm misurato il 31 gennaio 1998;
- valore minimo: -147.00 mm misurato il 16 febbraio 1996.

Generalmente per calcolare l'evaporazione sul serbatoio si devono moltiplicare le misure effettuate nella bacinella per un fattore correttivo: se la superficie del serbatoio è coperta da vegetazione l'evaporazione aumenta a causa del fenomeno dell'evapotraspirazione. Il coefficiente correttivo differisce di valore a seconda degli studi; gli studi più recenti indicano il valore di 1.2 [44].

Per quanto riguarda il serbatoio di Itezhi-tezhi non è necessario applicare questo coefficiente, infatti il vento sposta su un lato del serbatoio la vegetazione di giacinti d'acqua e la maggior parte del serbatoio è, quindi, priva di copertura [23].

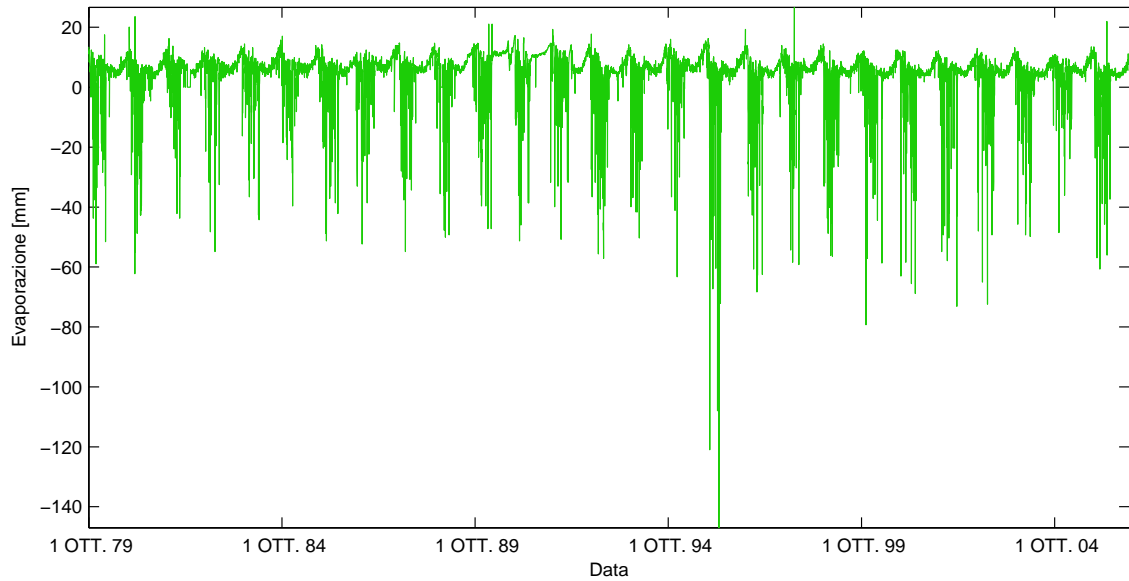


Figura 3.4: Evaporazione giornaliera misurata in una bacinella ("pan") in prossimità del serbatoio di Itezhi-tezhi: 1 ottobre 1979 - 30 settembre 2006.

3.2.3 Superficie

La relazione tra invaso e superficie libera [23] è riportata in Fig. 3.5 e l'equazione della curva interpolante¹ è riportata nella (3.2). L'invaso non può essere considerato cilindrico: vi sono forti variazioni di superficie libera al variare dell'invaso.

$$S_t^{R1} = 2.74 \cdot 10^{-10} \cdot (s_t^{R1})^3 - 6.66 \cdot 10^{-6} \cdot (s_t^{R1})^2 + 0.09 \cdot s_t^{R1} + 6.87 \quad (3.2)$$

3.2.4 Rilascio

Dal punto di vista gestionale un serbatoio è caratterizzato dai seguenti elementi:

- invaso utile: fascia entro la quale si può attuare la regolazione;
- scala di deflusso degli sfioratori superficiali;
- scala di deflusso dell'opera di presa.

Il rilascio, che avviene nell'intervallo $[t, t + 1)$, poiché il serbatoio di Itezhi-tezhi è regolato, dipende dalla decisione di erogazione u_t^{R1} assunta all'istante di tempo t . Il

¹Relazione che lega il volume espresso in milioni di m^3 con l'area espressa in km^2 .

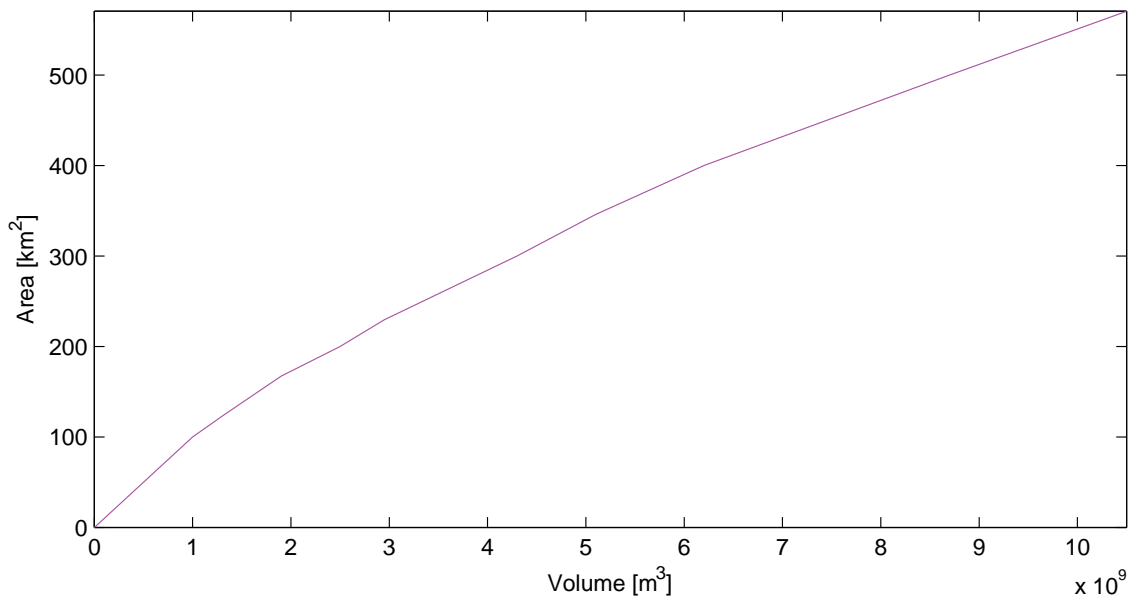


Figura 3.5: Andamento della superficie libera in funzione dell'invaso.

rilascio non coincide sempre con la decisione: dipende dall'afflusso, dall'evaporazione e deve essere fisicamente realizzabile, cioè compreso tra il minimo e il massimo volume erogabile durante l'intervallo temporale scelto.

Siccome anche il minimo e massimo volume erogabile nell'intervallo temporale $[t, t + 1)$ sono funzioni dell'afflusso e dell'evaporazione, bisognerebbe conoscere la traiettoria di queste grandezze in ogni istante temporale all'interno dell'intervallo giornaliero. Purtroppo non possediamo questa informazione: abbiamo un solo valore per l'afflusso ed uno per l'evaporazione riferiti all'intervallo $[t, t + 1)$. Si sono ipotizzati costanti l'afflusso e l'evaporazione durante tutta la giornata, pari rispettivamente alla portata e all'evaporazione misurate; abbiamo diviso l'intervallo temporale in sottointervalli più brevi (sottointervalli orari) nei quali si può approssimare costante il livello del serbatoio ed abbiamo calcolato per ogni intervallo il rilascio e l'invaso al tempo successivo, utilizzando l'equazione di bilancio (3.1). Iterando il processo e sommando il volume rilasciato durante ogni ora per tutta la durata del giorno, si ottengono il massimo e minimo rilascio giornaliero. E' sempre necessario confrontare la decisione di rilascio con il minimo e massimo rilascio: se la decisione di erogazione è inferiore al minimo rilascio, il rilascio sarà costituito da quest'ultimo, se è compresa tra il massimo e minimo rilascio, il rilascio è funzione della decisione, dell'afflusso e dell'evaporazione, mentre se la decisione è superiore al massimo rilascio, la portata che viene rilasciata è il massimo rilascio.

Invaso utile

La particolarità del serbatoio di Itezhi-tezhi consiste nel fatto che il limite superiore dell'invaso utile non coincide con la quota di entrata in funzione degli sfioratori, poiché lo sfioratore principale possiede tre chiuse di tipo radiale [23] che ne permettono la regolazione. Il limite inferiore della fascia di regolazione è superiore al livello di derivazione. La fascia di regolazione per il serbatoio di Itezhi-tezhi è, quindi, compresa tra (Fig. 3.6):

- quota di 1006 m (al di sotto di questo livello è necessario lasciare le paratoie completamente chiuse);
- quota di 1030.5 m (al di sopra di questo livello è necessario lasciare le paratoie completamente aperte).

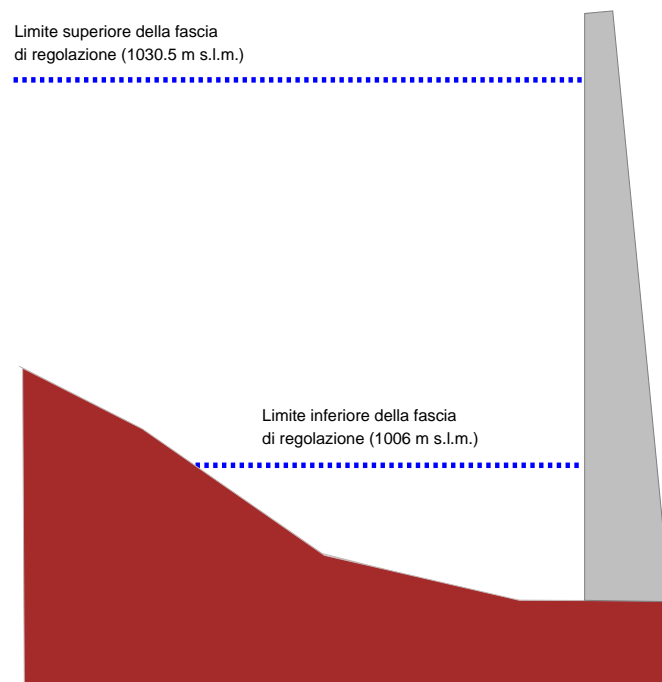


Figura 3.6: Sezione schematica del serbatoio di Itezhi-tezhi, con evidenziati i limiti della fascia di regolazione.

Scala di deflusso degli sfioratori superficiali

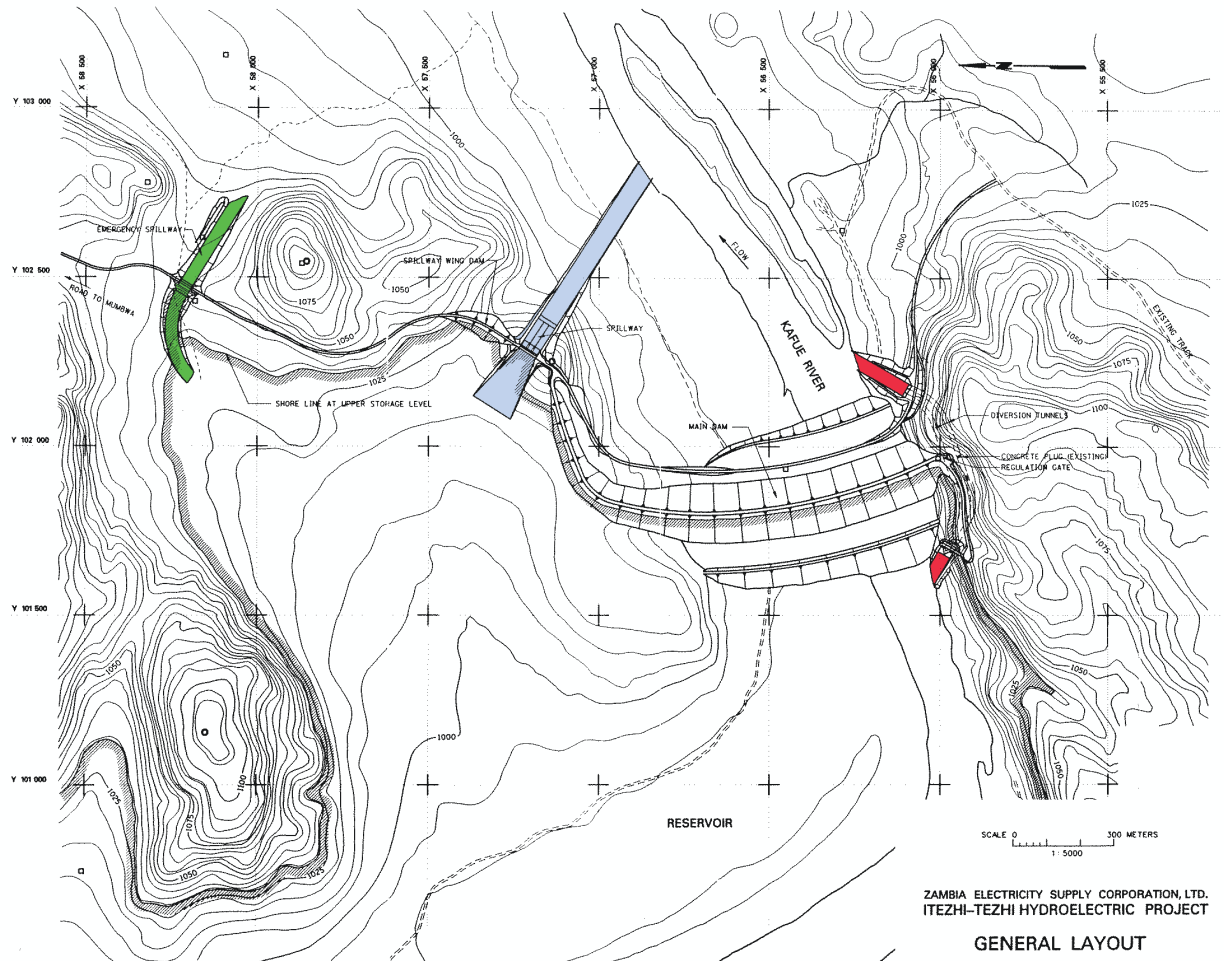


Figura 3.7: Planimetria della diga di Itezhi-tezhi [23].

Nel serbatoio di Itezhi-tezhi sono presenti due sfioratori (Fig. 3.7) con le seguenti caratteristiche:

- lo sfioratore principale (evidenziato in azzurro in Fig. 3.7) è posto a quota 1018.70 m, permette di scaricare al massimo $4450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ed è regolabile grazie a tre paratoie di tipo radiale, di 15 m di larghezza ciascuna (Fig. 3.8). Oltre alle paratoie lo sfioratore principale è costituito da uno scivolo sfioratore con struttura di dissipazione formata da ostacoli a forma di cucchiaio. Lo sfioratore è collocato tra la spalla sinistra della diga principale e una piccola diga a forma di sella. Lo scarico dello sfioratore è diretto nella valle del fiume a circa 800 m a valle del piede della diga principale.



Figura 3.8: Sfiatore principale del serbatoio di Itezhi-tezhi.

- Lo sfioratore di emergenza (evidenziato in verde in Fig. 3.7) entra in funzione a 1027.07 m e, per livelli superiori a 1033.69 m è del tipo a rottura dell'arginamento ("fuse plug"). Esso è posto in un canale aperto, attraverso una piccola sella situata a circa 100 m a nord dello sfioratore principale. L'arginamento a cedimento dovrebbe essere chiuso per quote inferiori a 1033.69 m e, a seguito del completo cedimento della parete di sbarramento, dovrebbe scaricare una portata di $750 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. L'acqua scaricata fluisce attraverso un breve scavato e scende poi a cascata lungo la valle per rientrare nel letto principale del fiume.

La portata totale degli sfioratori principale e di emergenza è di $5200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ al livello di 1033.69 m.

Le scale di deflusso dei due sfioratori [23] sono riportate in Fig. 3.9. Mediante interpolazione è stata ricavata la seguente relazione che lega il livello h^{R1} del serbatoio alla portata scaricata q^{sfp} dallo sfioratore principale, descritta nella (3.3).

$$q^{sfp} = \min\{q^{sfp1}, q^{maxsfp}\} \quad (3.3a)$$

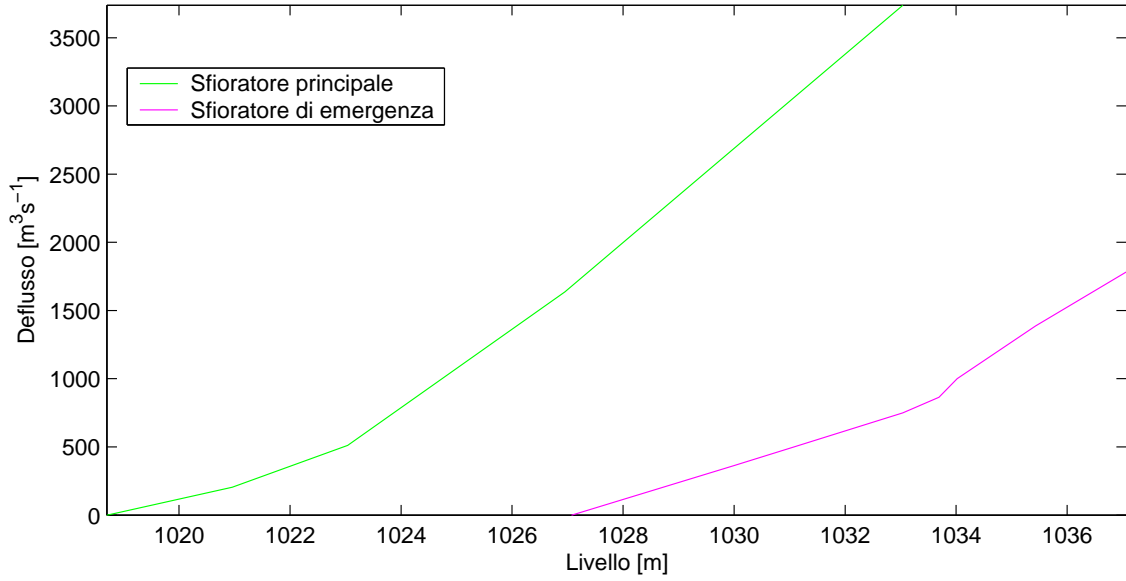


Figura 3.9: Scala di deflusso sfioratori del serbatoio di Itezhi-tezhi.

dove q^{maxsfp} è pari a $4450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

$$q_t^{sfp1} = \begin{cases} 0 & \text{se } h_t^{R1} \leq 1018.70 \text{ m} \\ 13.13 \cdot (h_t^{R1})^2 - 26695.75 \cdot h_t^{R1} + 13566498.52 & \text{se } 1018.70 \text{ m} < h_t^{R1} \leq 1023.04 \text{ m} \\ 5.75 \cdot (h_t^{R1})^2 - 11495.92 \cdot h_t^{R1} + 5745224.40 & \text{se } h_t^{R1} > 1023.04 \text{ m} \end{cases} \quad (3.3b)$$

Allo stesso modo è stata ricavata l'equazione dello sfioratore di emergenza, riportata

nella (3.4)

$$q_t^{sfe} = \begin{cases} 0 & \text{se } h_t^{R1} \leq 1027.07 \text{ m} \\ 0.49 \cdot (h_t^{R1})^2 - 888.74 \cdot h_t^{R1} + 393393.34 & \text{se } 1027.07 \text{ m} < h_t^{R1} \leq 1033.69 \text{ m} \\ 243.29 \cdot (h_t^{R1})^2 - 502645.91 \cdot h_t^{R1} + 259618804.96 & \text{se } 1033.69 \text{ m} < h_t^{R1} \leq 1034.02 \text{ m} \\ -10.32 \cdot (h_t^{R1})^2 + 21640.10 \cdot h_t^{R1} - 11336341.36 & \text{se } h_t^{R1} > 1034.02 \text{ m} \end{cases} \quad (3.4)$$

Scala di deflusso dell'opera di presa

Durante la costruzione della diga il fiume è stato deviato attraverso due gallerie. Ciascuna galleria ha una sezione a forma di ferro di cavallo di 190 m², con larghezza di circa 12.5 m e altezza 15 m. I principali lavori di deviazione comprendevano un canale di ingresso, un'opera di presa, le due gallerie e un canale di scarico a valle del bacino. La galleria sud fu tappata dopo la chiusura della paratoia dell'opera di presa. La galleria nord è utilizzata come scarico permanente di basso livello. Il flusso viene normalmente rilasciato dal bacino attraverso la paratoia di basso livello della precedente galleria di deviazione (evidenziata in rosso in Fig. 3.7). La parte a monte della galleria è normalmente sottoposta alla pressione totale dell'acqua del bacino. L'altra galleria risulta pure soggetta alla pressione totale dell'acqua nel bacino fino alla parete di chiusura.

La scala di deflusso dell'opera di presa è mostrata in Fig. 3.10.

Mediante interpolazione è possibile ricavare la relazione riportata nella (3.5) che esprime la relazione tra il livello h^{R1} del serbatoio e la portata scaricata q e il deflusso q^{presa} .

$$q_t^{presa} = \min\{q_t^{presa1}, q^{maxpresa}\} \quad (3.5a)$$

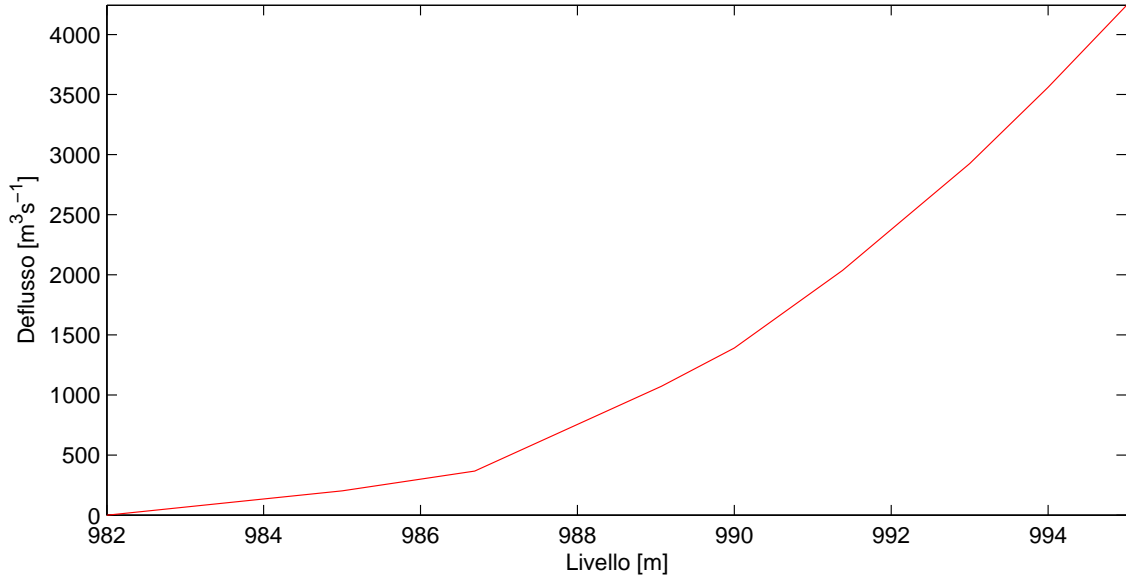


Figura 3.10: Scala di deflusso dell'opera di presa del serbatoio di Itezhi-tezhi.

dove $q^{maxpresa}=4244 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

$$q_t^{presa1} = \begin{cases} 0 & \text{se } h_t^{R1} \leq 982 \text{ m} \\ 6.24 \cdot (h_t^{R1})^2 - 12207.55 \cdot h_t^{R1} + 5969975.01 & \text{se } 982 \text{ m} < h_t^{R1} \leq 968.69 \text{ m} \\ 0.18 \cdot (h_t^{R1})^3 - 507.96 \cdot (h_t^{R1})^2 + 473496.55 \cdot h_t^{R1} - 146691517.09 & \text{se } h_t^{R1} > 968.69 \text{ m} \end{cases} \quad (3.5b)$$

3.2.5 Curve di massimo e minimo rilascio

Grazie alle informazioni ricavate dalla scala di deflusso degli sfioratori e dall'opera di presa, considerando l'invaso utile, è possibile calcolare il massimo e minimo deflusso istantaneo in funzione del livello (Fig. 3.11).

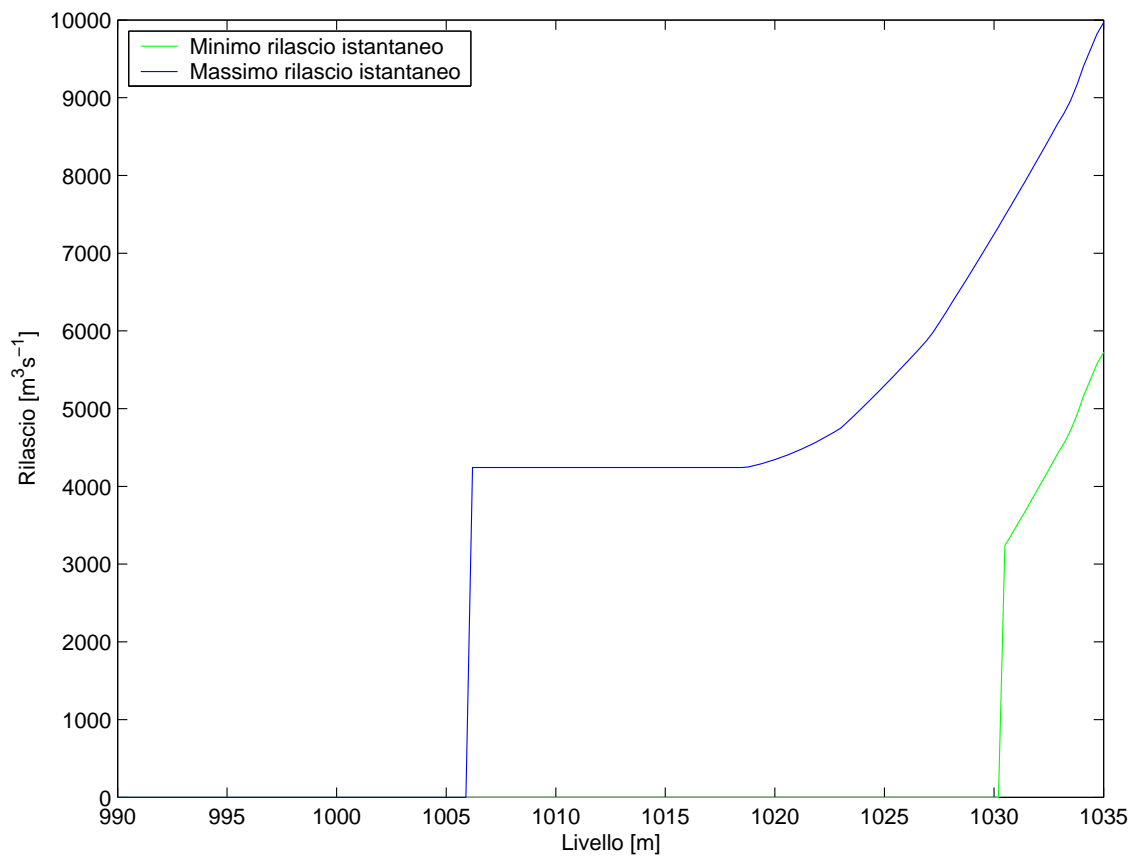


Figura 3.11: Scala di minimo e massimo rilascio istantaneo per il serbatoio di Itezhi-tezhi.

3.3 Centrale idroelettrica di Itezhi-tezhi

La centrale idroelettrica di Itezhi-tezhi ($U1$ in Fig. 3.1) ancora non è stata realizzata ma la assumiamo come tale, con portata massima turbinabile stabilita [23]. La centrale è progettata in sotterraneo. La (3.6) descrive la centrale idroelettrica di Itezhi-tezhi.

$$q_{t+1}^{turbU1} = \begin{cases} 0 & \text{se } r_{t+1}^{R1} < q^{min,U1} \\ \min(r_{t+1}^{R1}, q^{max,U1}) & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.6a)$$

$$G_{t+1}^{U1} = \psi g \eta^{U1} \gamma H_t^{U1} q_{t+1}^{turbU1} \quad (3.6b)$$

$$H_t^{U1} = h^{R1}(s_t^{R1}) - h^{U1} \quad (3.6c)$$

dove:

- G_{t+1}^{U1} è l'energia prodotta in kWh nell'intervallo temporale $[t, t+1)$;
- η^{U1} è l'efficienza dell'impianto, considerata pari a 0.89: è data dal prodotto dell'efficienza del generatore per l'efficienza delle turbine. L'efficienza del generatore è costante e pari a 0.97 [23]; l'efficienza delle turbine è funzione del numero dei giri caratteristico (Fig. 3.12). Si è assunto costante il rendimento della turbina; nel

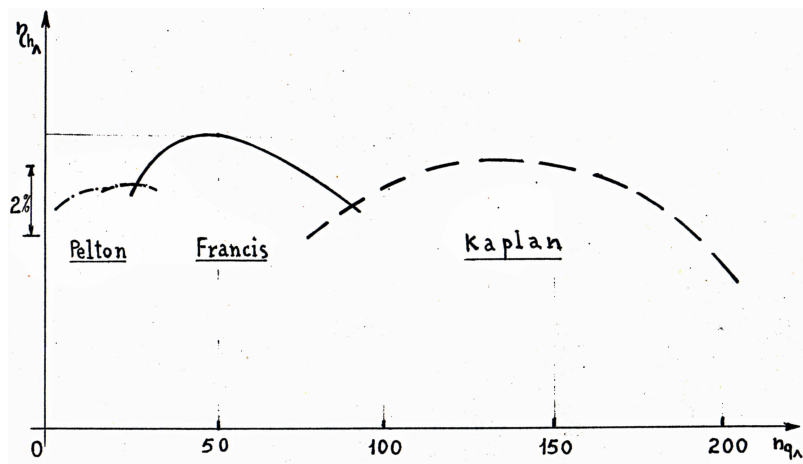


Figura 3.12: Rendimenti idraulici massimi di turbina al variare del numero di giri caratteristico [30].

progetto idroelettrico di Itezhi-tezhi è prevista l'installazione di due turbine Kaplan [23] che sono particolarmente adatte quando i salti motore non sono elevati (per

quanto riguarda la centrale idroelettrica di Itezhi-tezhi, il salto motore è di circa 43 m): si è ricavato il rendimento da letteratura, pari a 0.92 [30].

- ψ è un coefficiente di conversione dimensionale, il cui valore è il passo temporale $\Delta / 3.6 \cdot 10^6$;

- γ è la densità dell'acqua, pari a 1000 kg/m^3 ;

- h^{U1} è il livello del corpo idrico recettore, utile per calcolare il salto idraulico, stimato pari a 990 m s.l.m. (Fig. 3.13);

- $q_{t+1}^{min,U1}$ è la portata minima turbinabile, posta pari a 0;

- $q_{t+1}^{max,U1}$ è la portata massima turbinabile: sono presenti due condotte [23] con una portata massima totale di $312 \text{ m}^3/\text{s}$.

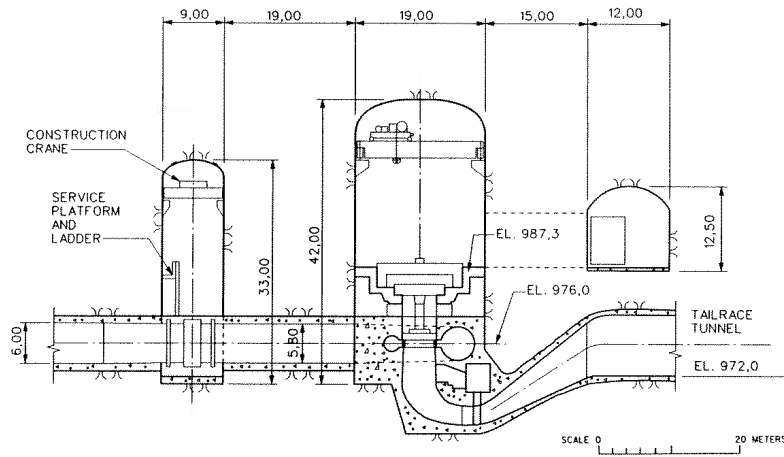


Figura 3.13: Sezione trasversale della centrale idroelettrica di Itezhi-tezhi [23].

3.4 Canale

Il tratto del fiume Kafue che va dal serbatoio di Itezhi-tezhi alla traversa fittizia che alimenta la cassa di espansione, posta prima dell'immissione del fiume nel serbatoio di Kafue Gorge (Kasaka in Fig. 3.1) è descritto modellisticamente come un canale (S in Fig. 3.1) nel quale la propagazione della portata è di tipo *plug flow*: la traslazione è rigida, senza effetto di laminazione. L'equazione che descrive il canale di monte è la (3.7).

$$q_{t+1}^o = r_{t-\tau+1}^{R1} \tag{3.7}$$

dove:

- q_{t+1}^o è la portata che giunge a Kasaka, pari al rilascio r_{t+1}^{R1} che giunge dopo τ passi temporali;
- τ è il valore che indica i passi temporali necessari per la portata rilasciata r_{t+1}^{R1} per raggiungere Kasaka. Per stimare il valore di ritardo ci siamo serviti di tre serie storiche:

- serie storica dei rilasci dal serbatoio di Itezhi-tezhi: portate giornaliere dall' 1 ottobre 1978 al 16 gennaio 2007;
- serie storica delle portate del fiume Kafue misurate a Nyimba, circa a metà del corso del fiume dal serbatoio di Itezhi-tezhi al serbatoio di Kafue Gorge: portate giornaliere dal 1 giugno 1972 al 31 gennaio 1987;
- serie storica delle portate del fiume misurate a Kasaka (nelle vicinanze della confluenza del fiume Kafue nel serbatoio di Kafue Gorge; le portate misurate a Kasaka sono molto più elevate rispetto a quelle di Nyimba a causa del fenomeno del rigurgito): 1 ottobre 1963 - 30 settembre 2006.

Per stimare più accuratamente il ritardo è stato necessario confrontare i picchi delle serie storiche dei rilasci dal serbatoio di Itezhi-tezhi e le portate misurate a Nyimba (Fig. 3.14) e la serie delle portate a Nyimba e quella delle portate misurate a Kasaka (Fig. 3.15), separatamente. Analizzando a quanti giorni di distanza sono situati i picchi sono stati ottenuti i risultati seguenti:

- ritardo dal serbatoio di Itezhi-tezhi alla stazione di Nyimba: 30 giorni;
- ritardo dalla stazione di Nyimba a quella di Kasaka: 80 giorni.

Il ritardo totale che subisce la portata dal serbatoio di Itezhi-tezhi a Kasaka è pari a 110 giorni. Considerando il passo temporale giornaliero, il ritardo τ è pari a 110.

3.5 Bacino delle Kafue Flats

Le Kafue Flats vengono alimentate dal fiume Kafue e da altri affluenti (C2 in Fig. 3.1); talvolta i fiumi africani non raggiungono l'oceano o altri fiumi ma si prosciugano verso la fine del loro percorso a causa della forte evaporazione e dell'infiltrazione nel terreno. Nelle vicinanze delle Kafue Flats sono presenti fiumi che si comportano in

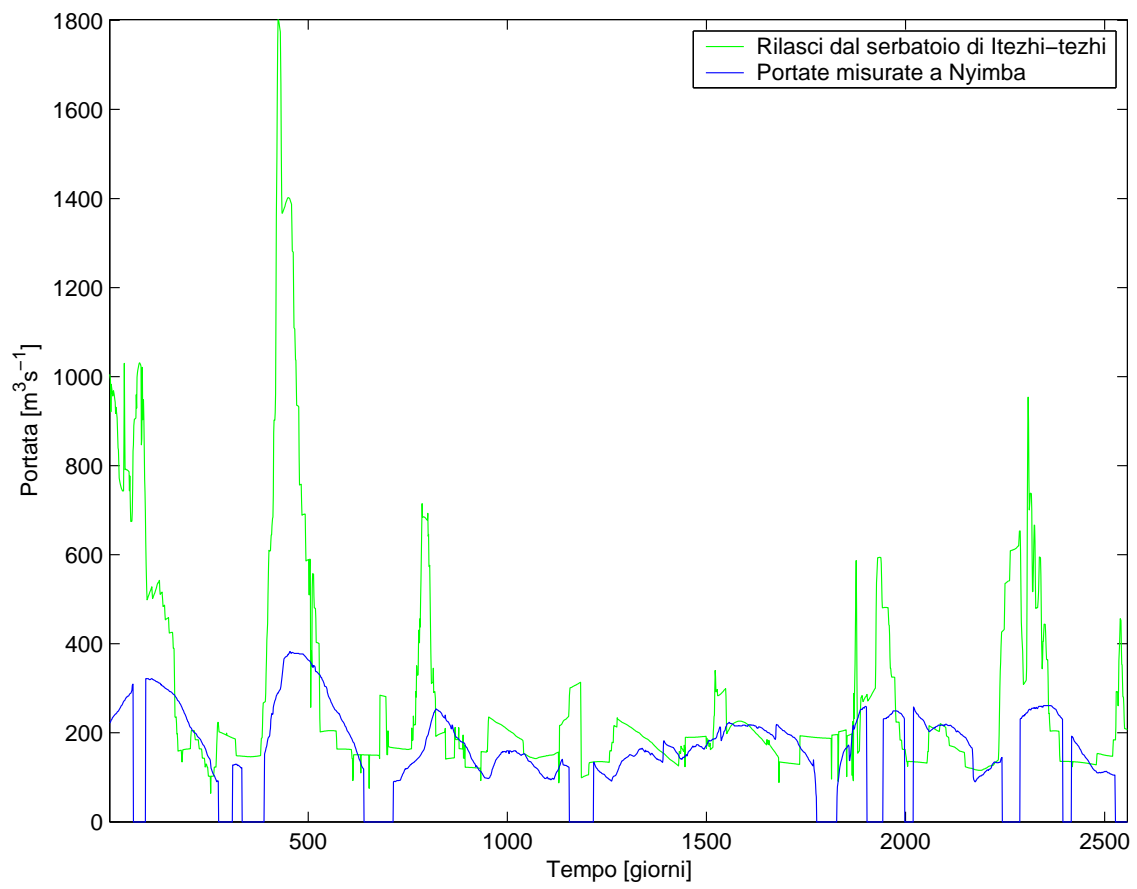


Figura 3.14: Confronto tra i rilasci dal serbatoio di Itezhi-tezhi e le portate misurate a Nyimba: 1 ottobre 1980 - 31 dicembre 1986.

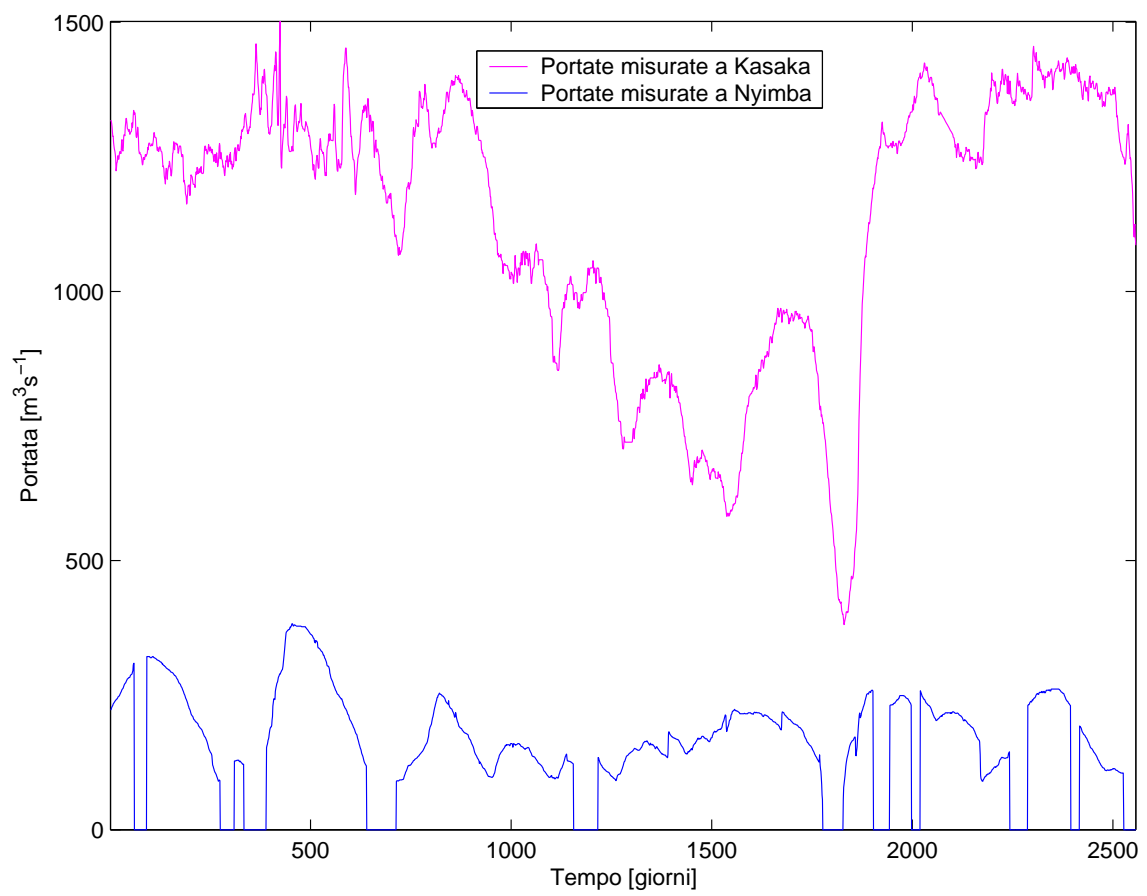


Figura 3.15: Confronto tra le portate misurate a Nyimba e le portate misurate a Kasaka: 1 ottobre 1980 - 31 dicembre 1986.

questo modo; essi non sono affluenti del Kafue ma, quando la superficie allagata delle Kafue Flats diventa significativa, vengono raggiunti dall'acqua e diventano affluenti dell'area umida. Inoltre gli afflussi alle Kafue Flats non si limitano solamente alle acque superficiali: un contributo significativo al bilancio idrologico è dato dalle acque sotterranee [6].

KAFRIBA è un modello sviluppato dalla DHV Consulting Engineers per simulare il sistema del fiume Kafue dal serbatoio di Itezhi-tezhi a quello di Kafue Gorge. Questo modello permette di simulare le esondazioni delle Kafue Flats, avendo come ingressi gli afflussi al serbatoio di Itezhi-tezhi, i contributi laterali alle Kafue Flats e i valori della pioggia. Gli afflussi alle Kafue Flats misurati o stimati, utilizzati da KAFRIBA, sono elencati in Tab. 3.2.

Purtroppo abbiamo a disposizione una serie storica troppo breve degli afflussi alle Kafue Flats (1 gennaio 2002 - 30 settembre 2004) per poter simulare adeguatamente il sistema. E', quindi, necessario ricorrere ad una stima approssimata degli afflussi alle Kafue Flats: l'afflusso alle Kafue Flats è ipotizzato pari al 20% dell'afflusso entrante a Itezhi-tezhi, considerato nello stesso intervallo di tempo [23].

3.6 Serbatoio delle Kafue Flats

Nella realtà le Kafue Flats non sono un serbatoio ma una vasta area umida; nella rappresentazione modellistica queste paludi di notevole pregio ambientale sono considerate come una cassa di espansione del fiume: sono rappresentate come un componente dinamico ($R2$ in Fig. 3.1) poiché nella (3.8) è presente lo stato. La decisione di rilascio dei due serbatoi, la quale si deve basare sullo stato del sistema globale, tiene conto, quindi, anche dello stato delle Kafue Flats. Quando la portata del fiume Kafue supera la soglia di $170 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ [33], il fiume esce dall'alveo.

Di particolare interesse è la presenza del fenomeno del rigurgito: a causa delle bassissime pendenze il serbatoio di Kafue Gorge si può espandere a monte a tal punto da unirsi con le Kafue Flats e formare un unico grande bacino.

L'equazione che descrive la transizione di stato del serbatoio delle Kafue Flats è la seguente:

$$s_{t+1}^{R2} = \max\{s_t^{R2} + a_{t+1}^2 + q_{t+1}^2 - e_{t+1}^{R2} S^{R2}(s_t^{R2}), 0\} \quad (3.8)$$

dove:

- e_{t+1}^{R2} è il tasso di evaporazione nell'intervallo $[t, t + 1)$;
- a_{t+1}^2 è l'afflusso proprio delle Kafue Flats;

Afflussi alle Kafue Flats
Nanzbila and Nkale tributaries
Mbuma and Baunza tributaries
Mulele plain
Banga and Lukomezi tributaries
Connection of Ilelebu plain
Area south of Naminwe plains
Nansenga tributary
Lutale tributary
Kabulamwanda plains
Chibila tributary
Munyeke tributary
Plains north of Lukwato arm
Kasaka tributary
Nangoma tributary
Magoye tributary
Blue Lagoon /Luwato lagoon
Mwembeshi tributary
Kaleye tributary
Mazabuka and Nakanega tributaries
Dem, Mungu, Muchita to Gorge trib's

Tabella 3.2: Elenco degli afflussi alle Kafue Flats di ingresso al modello KAFRIBA.

- q_{t+1}^2 è il volume di acqua proveniente dal fiume Kafue: può essere positivo o negativo a seconda del livello del fiume rispetto alle Kafue Flats.

Il serbatoio delle Kafue Flats è, quindi, alimentato da un bacino proprio e dalla portata che giunge dal fiume Kafue; questa portata può essere positiva se il livello del fiume supera il livello di pelo libero delle Kafue Flats e la soglia di esondazione, oppure l'afflusso può essere negativo se il livello delle Kafue Flats supera quello del fiume Kafue, poiché in questo caso l'acqua si riversa dalle Kafue Flats nel fiume Kafue. La (3.9a) descrive questo afflusso entrante o uscente che mette in comunicazione le Kafue Flats con il fiume Kafue.

Le Figg. 3.16, 3.17 permettono di chiarire meglio la simbologia utilizzata.

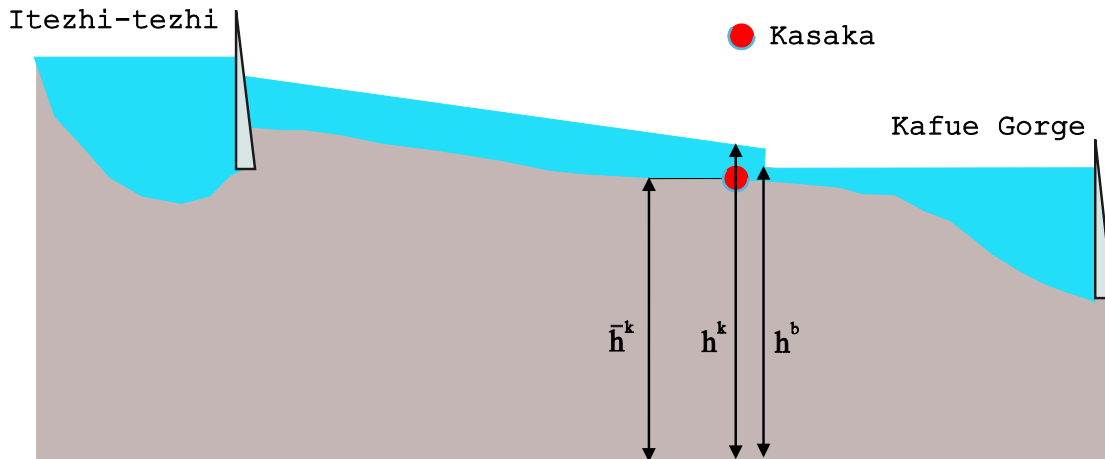


Figura 3.16: Rappresentazione longitudinale del sistema con evidenziata la simbologia utilizzata nella (3.9).

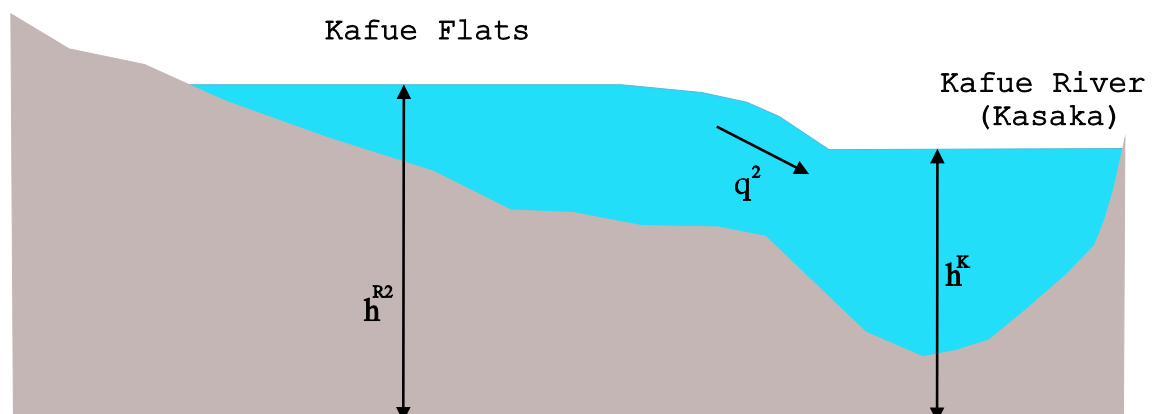


Figura 3.17: Rappresentazione trasversale del sistema a Kasaka con evidenziata la simbologia utilizzata nella (3.9).

$$q_{t+1}^2 = \begin{cases} 0 & \text{se } h_t^{R2} = \bar{h} \text{ e } h_{t+1}^k \leq \bar{h} \\ \max\{f(h_{t+1}^k) - f(h_t^{R2}), -s_t^{R2}\} & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.9a)$$

con

$$h_{t+1}^k = \begin{cases} (1/\alpha)q_{t+1}^o + h_t^b & \text{se } q_{t+1}^o \leq \alpha(\bar{h} - h_t^b) \\ \gamma[q_{t+1}^o - \alpha(\bar{h} - h_t^b)]^\beta + \bar{h} & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.9b)$$

$$h_t^b = \max\{\bar{h}^k, h_t^{R3}\} \quad (3.9c)$$

$$S_t^{R2} = S_t^{R2}(s_t^{R2}) \quad (3.9d)$$

dove:

- h_{t+1}^k è il livello del fiume a Kasaka;
- h_t^b è il livello del rigurgito;
- \bar{h} è il livello oltre il quale si verifica l'esonazione, pari a 975 m; questa soglia corrisponde alla portata di $170 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$;
- \bar{h}^k è il livello del letto del fiume, pari a 970 m;
- α è un parametro, stimato pari a 34, che permette di trovare la portata del fiume dato il livello, quando la portata è al di sotto della portata oltre la quale si verifica l'esonazione;
- β e γ sono parametri, stimati pari rispettivamente a 0.18 e 0.3, che permettono di trovare la portata del fiume dato il livello, quando il fiume è al di sopra della soglia di esonazione;
- f è la funzione che esprime la scala di deflusso delle Kafue Flats nel fiume Kafue; si ipotizza che il fiume Kafue abbia la medesima scala di deflusso quando la portata scorra dal fiume nelle Kafue Flats, questa funzione verrà approfondita nel Par. 3.6.3;
- S_t^{R2} è la superficie delle Kafue Flats, funzione dell'invaso; tale funzione sarà approfondita nel Par. 3.6.2.

La portata che esce dalla traversa fittizia (Kasaka in Fig. 3.1) è data dalla (3.10).

$$q_{t+1}^k = q_{t+1}^o - q_{t+1}^2 \quad (3.10)$$

3.6.1 Evaporazione

A differenza del serbatoio di Itezhi-tezhi, per il serbatoio delle Kafue Flats non sono disponibili dati di evaporazione giornalieri ma solamente valori di evaporazione

mensili, riportati in Tab. 3.3. La vegetazione delle Kafue Flats gioca un ruolo

Mese	Evaporazione netta [mm]
Ottobre	232
Novembre	78
Dicembre	-32
Gennaio	-66
Febbraio	-60
Marzo	48
Aprile	136
Maggio	144
Giugno	108
Luglio	144
Agosto	168
Settembre	204

Tabella 3.3: Valori mensili dell'evaporazione per il serbatoio delle Kafue Flats: i valori positivi indicano che la quantità evaporata è stata superiore alla pioggia, mentre i valori negativi indicano che le precipitazioni sono state più consistenti dell'evaporazione.

fondamentale nell'evaporazione, poiché la copertura della superficie del serbatoio da parte dei giacinti d'acqua aumenta l'evapotraspirazione, come già affermato nel Par. 3.2.2. E', quindi, necessario moltiplicare i valori di evaporazione per il coefficiente correttivo, pari a 1.2 in modo da tener conto dell'aumento dell'evapotraspirazione.

3.6.2 Superficie

Le Kafue Flats sono una vasta area umida che presenta una superficie molto variabile nel tempo dell'anno, poiché dipende dalle inondazioni provocate dal fiume Kafue. La relazione che lega il volume del serbatoio delle Kafue Flats all'area è riportata in Fig. 3.18 e l'equazione della curva interpolante² è la (3.11).

$$S_t^{R2} = - 0.06 \cdot (s_t^{R2})^6 + 1.97 \cdot (s_t^{R2})^5 - 26.45 \cdot (s_t^{R2})^4 + 181.26 \cdot (s_t^{R2})^3 - 680.33 \cdot (s_t^{R2})^2 + 1473.71 \cdot s_t^{R2} + 6.37 \quad (3.11)$$

²Relazione che lega il volume espresso in milioni di m³ con l'area espressa in km².

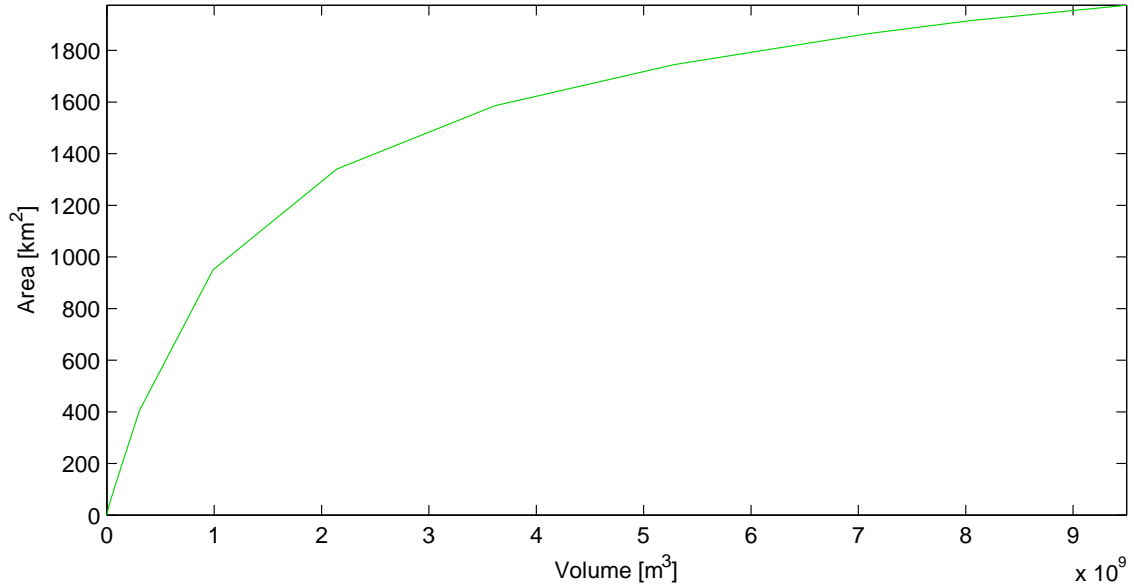


Figura 3.18: Relazione tra volume e area per il serbatoio delle Kafue Flats.

3.6.3 Scala di deflusso

La scala di deflusso che compare nella (3.9a) del serbatoio delle Kafue Flats è rappresentata in Fig. 3.19. Mediante interpolazione si ottiene la funzione riportata nella (3.12) che approssima la scala di deflusso della Fig. 3.19. Si ipotizza che la scala di deflusso sia la stessa per il serbatoio delle Kafue Flats e per il fiume Kafue, per questo al posto della h_t che compare nella (3.12) si inseriscono h_t^{R2} e h_t^k , con la differenza che, mentre la (3.12) per il serbatoio delle Kafue Flats deve essere integrata rispetto al tempo, per il fiume non è necessario procedere alla integrazione, poiché il livello del fiume è considerato costante lungo tutto il passo temporale.

$$f = \begin{cases} 0 & \text{se } h_t \leq 975 \text{ m} \\ 9.76 \cdot h_t^2 - 19024.29 \cdot h_t + 9268770.24 & \text{se } 975 \text{ m} < h_t \leq 981 \text{ m} \\ 330 \cdot h_t - 323310 & \text{se } 981 \text{ m} < h_t \leq 982 \text{ m} \\ 76.02 \cdot h_t^3 - 224337.41 \cdot h_t^2 + 220667631.37 \cdot h_t - 72352931358.36 & \text{se } h_t > 982 \text{ m} \end{cases} \quad (3.12)$$

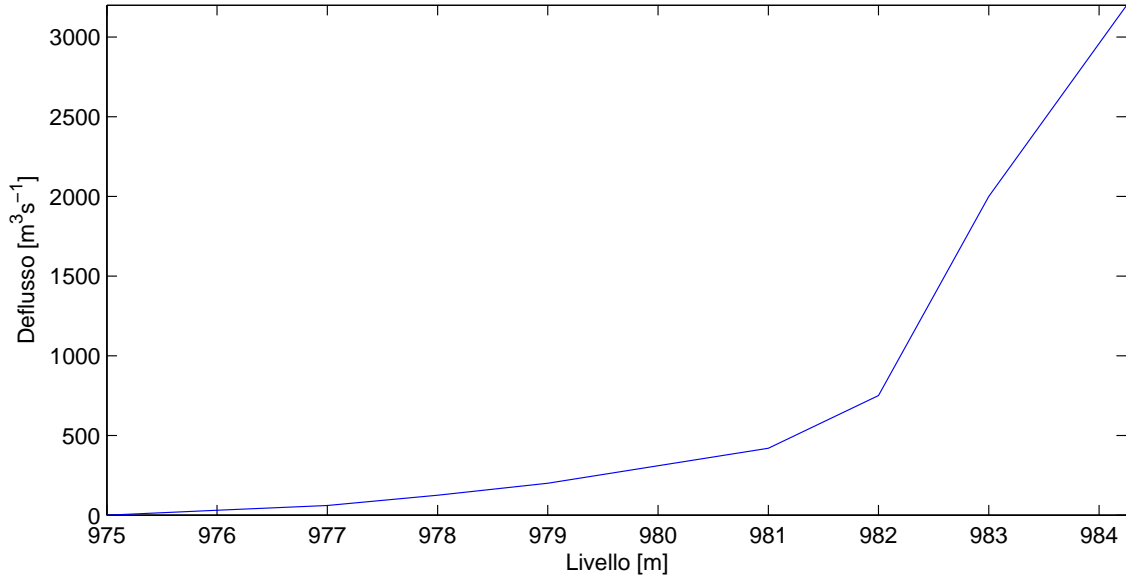


Figura 3.19: Relazione tra livello e deflusso riguardante le Kafue Flats.

3.7 Traversa irrigua

Prima dell'immissione del fiume nel serbatoio di Kafue Gorge l'acqua subisce una derivazione al fine di fornire acqua al distretto irriguo, nel quale si coltivano prevalentemente canna da zucchero e soia (Par. 2.2.1). Si tratta di una traversa regolata ($U3$ in Fig. 3.1), ma viene trattata come non regolata poiché, al fine del calcolo degli indicatori presentati nel Cap. 2, non sono rilevanti le variazioni di livello dovute alla derivazione irrigua, per quanto riguarda il salto motore della centrale idroelettrica a valle di Kafue Gorge e per il fenomeno del rigurgito. L'equazione della traversa considerata non regolata è, quindi, descritta dalla (3.13).

$$q_{t+1}^{U3} = \min\{q_{t+1}^k, w_t^{U3}\} \quad (3.13a)$$

$$q_{t+1}^3 = q_{t+1}^k - q_{t+1}^{U3} \quad (3.13b)$$

dove:

w_t^{U3} è la domanda irrigua analizzata nel Par. 2.2.

3.8 Serbatoio di Kafue Gorge

La diga di Kafue Gorge ($R3$ in Fig. 3.1) è stata la prima diga costruita nel sistema considerato: è stata ultimata nel 1971. È alta 50 m e lunga 376 m e permette

di immagazzinare $785 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ [33]. Lo scopo per il quale è stata costruita è la produzione idroelettrica: al termine di Kafue Gorge è presente un notevole dislivello, circa 400 m (Fig. 3.20) da permettere una significativa produzione idroelettrica. Attualmente, vista la presenza del serbatoio di Itezhi-tezhi, quello di Kafue Gorge funge da vasca di carico. L'equazione di transizione di stato del serbatoio di Kafue

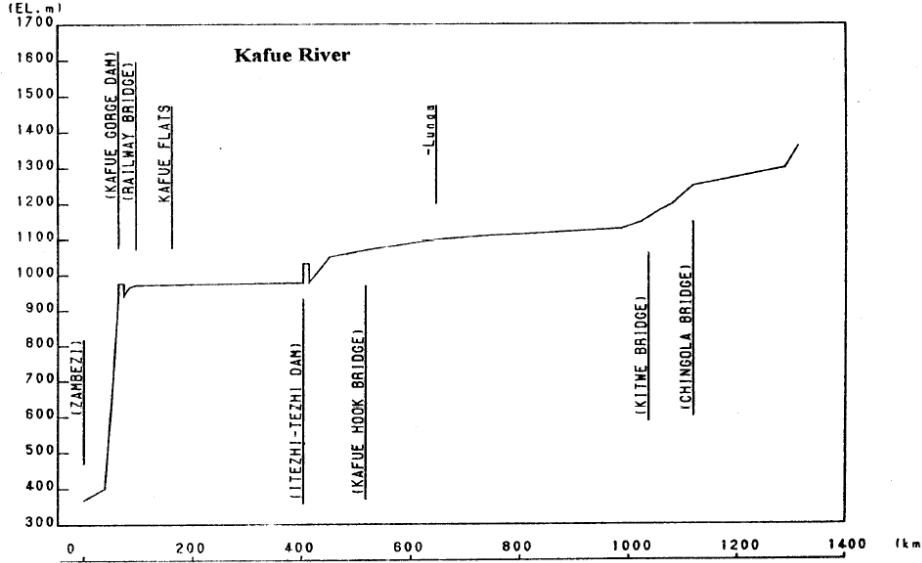


Figura 3.20: Profilo del fiume Kafue.

Gorge è descritta dalla (3.14).

$$s_{t+1}^{R3} = s_t^{R3} + q_{t+1}^3 - e_{t+1}^{R3} S^{R3}(s_{t+1}^{R3}) - r_{t+1}^{R3} \quad (3.14a)$$

$$r_t^{R3} = R^{R3}(s_t^{R3}, u_t^{R3}, e_{t+1}^{R3}, q_{t+1}^3) \quad (3.14b)$$

$$S_t^{R3} = S_t(s_t^{R3}) \quad (3.14c)$$

dove:

- s_t^{R3} è l'invaso al tempo t ;
- e_{t+1}^{R3} è il tasso di evaporazione nell'intervallo $[t, t + 1)$ considerato pari all'evaporazione presente nelle Kafue Flats, riportata in Tab. 3.3;
- q_{t+1}^3 è l'afflusso che giunge a Kafue Gorge;
- r_{t+1}^{R3} è il rilascio da Kafue Gorge. La funzione di rilascio è ottenuta integrando le funzioni di massimo e minimo rilascio istantanee, mostrate in Fig. 3.21.

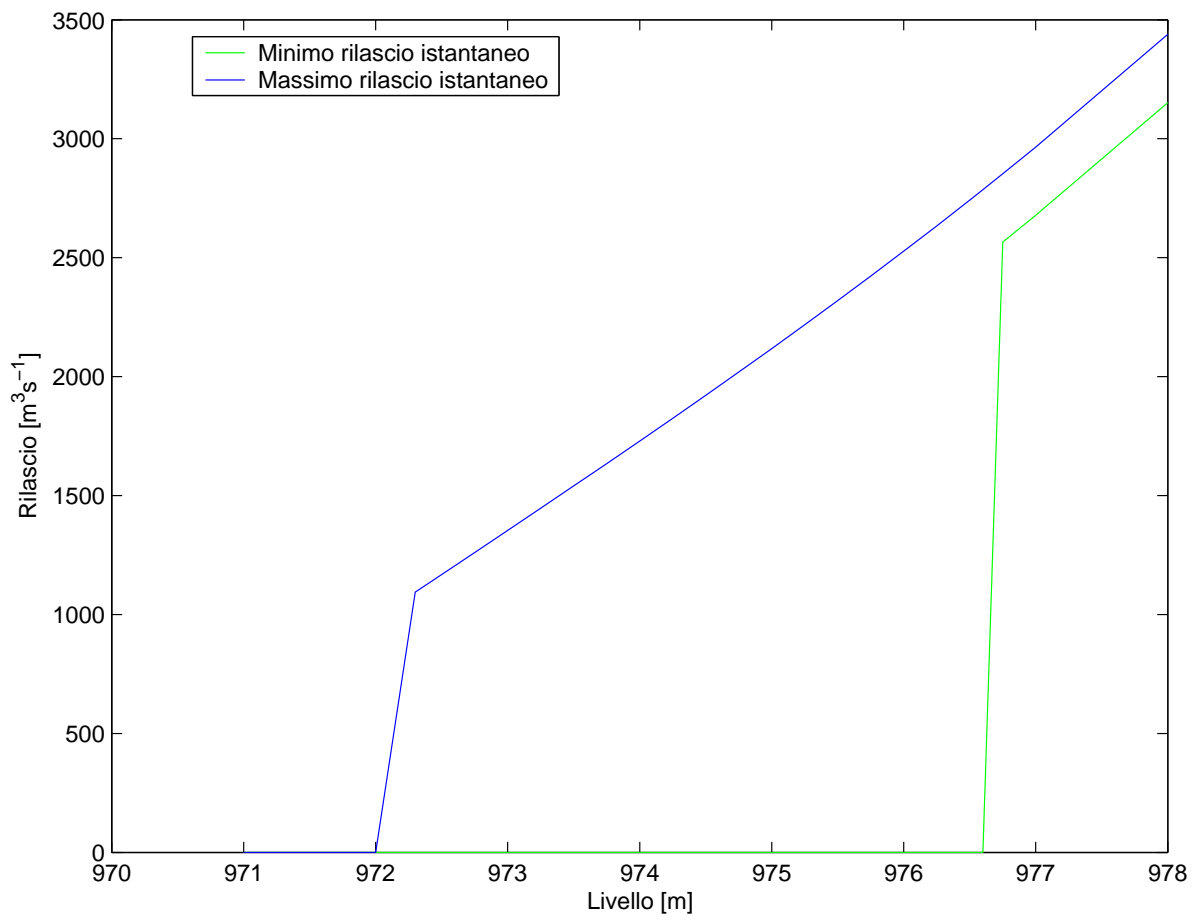


Figura 3.21: Minimo e massimo rilascio istantaneo per il serbatoio di Kafue Gorge.

E' disponibile una serie storica di livelli che vanno dal 1 ottobre 1953 al 31 ottobre 2006; essi sono misurati giornalmente; lo zero è pari al livello medio del mare. Il valore massimo di livello del serbatoio registrato nel periodo 1 ottobre 1953 - 31 ottobre 2006 è pari a 978.03 (20 giugno 1977), mentre il minimo è pari a 972.10 (12 novembre 1959).

La relazione grafica tra invaso e area del serbatoio di Kafue Gorge è riportata in Fig. 3.22 e l'equazione della curva interpolante³ è riportata nella (3.15).

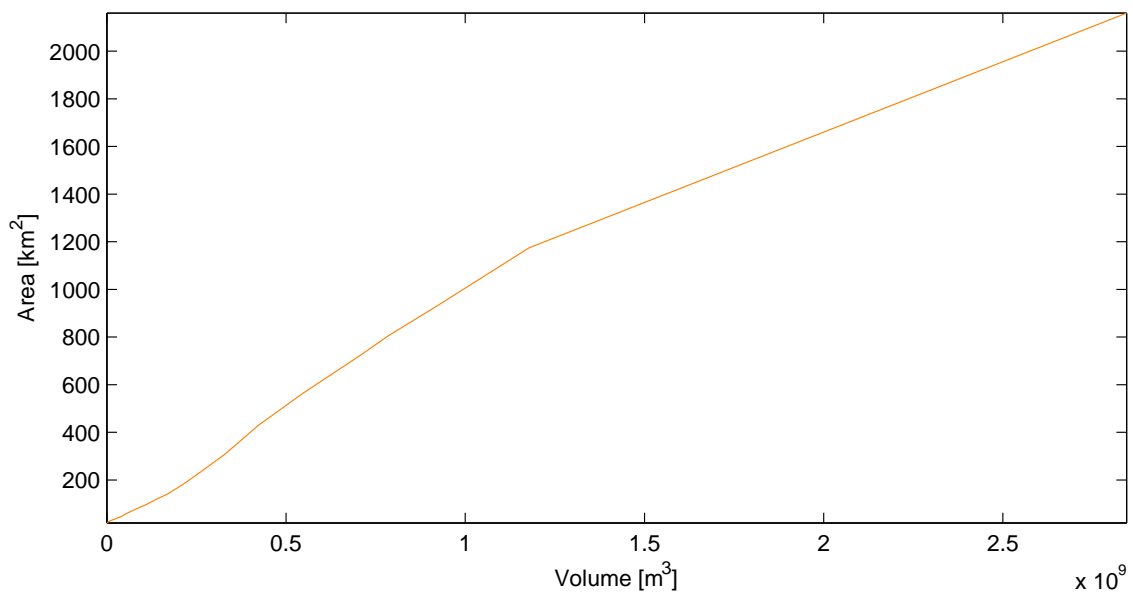


Figura 3.22: Andamento della superficie libera in funzione dell'invaso.

$$S_t^{R3} = - 0.00000009 \cdot (s_t^{R3})^3 + 0.0002 \cdot (s_t^{R3})^2 + 0.89 \cdot s_t^{R3} + 7.93 \quad (3.15)$$

3.9 Centrale idroelettrica di Kafue Gorge

La centrale a valle di Kafue Gorge ($U4$ in Fig. 3.1) è l'unica ad essere presente nel sistema; è descritta dalla (3.16).

³Relazione che lega il volume espresso in milioni di m^3 con l'area espressa in km^2 .

$$q_{t+1}^{turbU4} = \begin{cases} 0 & \text{se } r_{t+1}^{R3} < q^{min,U4} \\ \min(r_{t+1}^{R3}, q^{max,U4}) & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.16a)$$

$$G_{t+1}^{U4} = \psi g \eta^{U4} \gamma H_t^{U4} q_{t+1}^{turbU4} \quad (3.16b)$$

$$H_t^{U4} = h^{R1}(s_t^{R1}) - h^{U4} \quad (3.16c)$$

dove:

- G_{t+1}^{U4} è l'energia prodotta in kWh nell'intervallo temporale [t,t+1);
- η^{U4} è l'efficienza dell'impianto, pari a 0.88;
- ψ è un coefficiente di conversione dimensionale, il cui valore è il passo temporale $\Delta/3.6 \cdot 10^6$;
- γ è la densità dell'acqua, pari a 1000 kg/m³;
- h^{U4} è il livello del corpo idrico recettore, utile per calcolare il salto idraulico, stimato pari a 580 m s.l.m.;
- $q_{t+1}^{min,U4}$ è la portata minima turbinabile: è stata posta pari a 0;
- $q_{t+1}^{max,U4}$ è la portata massima turbinabile: sono presenti due condotte con una portata massima totale di 252 m³/s.

Capitolo 4

Formulazione del problema di controllo

Lo scopo della presente tesi è l'individuazione della politica ottima per la gestione del sistema, descritto nel Cap. 3.

In primo luogo è necessario definire gli indicatori considerati nell'ottimizzazione. La scelta è ricaduta sugli indicatori più significativi; si sono considerati i seguenti indicatori per passo:

- la somma degli indicatori della produzione idroelettrica delle due centrali di Itezhi-tezhi e di Kafue Gorge ($i_t^{U1} + i_t^{U4}$);
- l'indicatore i_t^{U2} , che riguarda l'ambiente immediatamente a valle del serbatoio di Itezhi-tezhi ;
- l'indicatore i_t^{recess} , relativo all'agricoltura di recessione e all'ambiente immediatamente a monte del serbatoio di Kafue Gorge.

L'ottimizzatore, però, risolve solamente problemi mono-obiettivo, quindi è necessario trasformare il nostro problema a molti obiettivi in un problema ad un solo obiettivo. Per fare ciò bisogna aggregare gli indicatori in un indicatore aggregato:

$$g_t = \lambda^1 \cdot (i_t^{U1} + i_t^{U4}) + \lambda^2 \cdot (i_t^{U2}) + \lambda^3 \cdot (i_t^{recess}) \quad (4.1a)$$

$$\sum_{i=1}^3 \lambda^i = 1 \quad (4.1b)$$

Il problema di progetto di una politica ottima può essere schematizzato come un

problema di controllo in anello chiuso a tempo discreto, periodico di periodo T , pari ad un anno. Il problema di controllo, su orizzonte infinito, ha la seguente formulazione:

$$p_H^* = \arg \max_{p_H} E_{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_h} \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t g_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t, \varepsilon_{t+1}) \right] \quad (4.2a)$$

$$\mathbf{x}_{t+1} = f_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t, \varepsilon_{t+1}) \quad t = 0, \dots, \infty \quad (4.2b)$$

$$m_t(\mathbf{x}_t) = \mathbf{u}_t \in \mathcal{U}_t(\mathbf{x}_t) \quad t = 0, \dots, \infty \quad (4.2c)$$

$$\varepsilon_{t+1} \sim \phi_t(\cdot | \mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t) \quad t = 0, \dots, \infty \quad (4.2d)$$

$$\mathbf{x}_0 \text{ dato} \quad (4.2e)$$

$$p_H \triangleq \{m_t(\cdot); t = 0, \dots, \infty\} \quad (4.2f)$$

dove:

- p_H^* è la politica ottima, periodica di periodo T ;
- \mathbf{x}_t è il vettore delle variabili di stato;
- \mathbf{u}_t è il vettore delle variabili di controllo;
- ε_{t+1} è il disturbo agente sul sistema;
- γ^t è il tasso di sconto da applicare per permettere la convergenza dell'algoritmo.

Vi sono vari modi per risolvere il problema:

- **La Programmazione Dinamica Stocastica** è uno dei metodi più utilizzati per progettare politiche di gestione Pareto-ottime; si basa sulla formulazione del problema di progetto della politica di gestione, come un processo decisionale sequenziale. Una decisione presa in un istante temporale produce non solo un costo immediato ma influenza lo stato successivo del sistema e di conseguenza i costi futuri. La PDS presenta due problemi: la "maledizione della dimensionalità" [2] e la "maledizione della modellizzazione" [4]. Per "maledizione della dimensionalità" si intende che la complessità di calcolo cresce esponenzialmente con la dimensione dello stato, dei controlli e dei disturbi. Con i termini "maledizione della modellizzazione" si considera la necessità di avere un modello esplicito del sistema per poter anticipare gli effetti delle transizioni del sistema. L'informazione esogena, come la temperatura o la precipitazione, utile per gestire il sistema [52], [24], non può essere utilizzata dalla PDS, poiché sarebbe necessario descrivere ogni variabile esogena con

un modello, lo stato sarebbe allargato e ricadremmo nella "maledizione della dimensionalità". Per superare la "maledizione della dimensionalità" è possibile scomporre il sistema completo in sottosistemi più semplici [53] oppure è necessario avanzare alcune ipotesi sulla regolarità della funzione valore ottima della Programmazione Dinamica Stocastica. Alcune soluzioni adottate per quest'ultimo scopo sono l'utilizzo di una griglia di discretizzazione lasca con un'approssimazione continua della funzione valore: polinomi [3], spline [27] e reti neurali artificiali [4], [8], [9].

- **L'Apprendimento per Rinforzo** permette di affidarsi direttamente all'esperienza, in linea sul sistema reale (con costi e tempi insostenibili per i sistemi idrici) oppure fuori linea con un simulatore del sistema. Un approfondimento di questo approccio è una versione parzialmente *model free* del Q-learning [7]: i serbatoi sono ben descritti da equazioni semplici, mentre il bacino imbrifero ha una descrizione complessa e molto incerta dal punto di vista modellistico; per questo motivo l'approccio *model free* si riferisce solitamente a quest'ultimo componente.
- **Il fitted Q-iteration** è un nuovo approccio che combina i concetti di apprendimento fuori linea con l'approssimazione funzionale della funzione valore. La difficoltà degli algoritmi tradizionali di approssimazione stocastica è la necessità della stima dei parametri ad ogni passo di iterazione; il fitted Q-iteration utilizza una approssimazione basata sugli alberi [5], che permette una elevata flessibilità di modellizzazione e una notevole efficienza di calcolo. Un ulteriore vantaggio del fitted Q-iteration è la sua proprietà di convergenza: il Q-learning tradizionale converge solamente quando gli aggiornamenti della funzione valore sono realizzati in maniera incrementale, il fitted Q-iteration processa l'informazione in modo batch, utilizza simultaneamente tutta l'esperienza di apprendimento per aggiornare la funzione valore; questo procedimento velocizza di parecchio il tasso di convergenza [28].

4.1 Apprendimento per rinforzo batch basato sugli alberi

L'apprendimento per rinforzo (RL) permette di superare la "maledizione della modellizzazione", poiché non è necessaria la presenza di un modello esplicito del sistema,

ma non riesce ad eliminare il problema della "maledizione della dimensionalità". L'algoritmo di fitted Q-iteration proposto da Ernst [13], il quale si basa su lavori precedenti sulla fitted value iteration [19] [36], permette di diminuire il tempo di calcolo, grazie alla combinazione dell'idea dell'apprendimento dall'esperienza con il concetto di approssimazione continua della funzione valore: la mappatura continua della coppia stato-decisione consente una accuratezza, pari alla rappresentazione tabellare, creata con una griglia molto densa; è, quindi, possibile una discretizzazione molto più lasca per lo spazio stato-decisione.

4.1.1 L'algoritmo di fitted Q-iteration

L'algoritmo di fitted Q-iteration non richiede un modello esplicito del sistema: la politica è determinata a partire dall'esperienza, costituita da un dataset finito \mathcal{F} composto da tuple della forma $\langle \mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t, \mathbf{x}_{t+1}, g_{t+1} \rangle$, ovvero

$$\mathcal{F} = \{ \langle \mathbf{x}_t^l, \mathbf{u}_t^l, \mathbf{x}_{t+1}^l, g_{t+1}^l \rangle, l = 1, \dots, \#\mathcal{F} \} \quad (4.3)$$

dove

- \mathbf{x}_t^l è il vettore di stato;
- \mathbf{u}_t^l è il vettore dei controlli;
- g_{t+1}^l è l'indicatore aggregato;
- $\#\mathcal{F}$ rappresenta la cardinalità di \mathcal{F} .

Ogni tupla contiene una transizione di un singolo passo del sistema; l'insieme delle tuple può essere generato in vario modo: serie di simulazione ad un passo o multi step oppure da una singola traiettoria del sistema. Chiaramente il risultato dell'algoritmo del fitted Q-iteration è una approssimazione della politica ottima, poiché in questo modo si genera la politica a partire da un numero finito di transizioni. Il fitted Q-iteration produce un'approssimazione delle funzioni Q ottime del problema, estendendo in maniera iterativa l'orizzonte di ottimizzazione, ovvero risolvendo in maniera iterativa il problema di controllo.

La funzione Q è definita nel seguente modo:

$$Q_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t) = g_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t) + \gamma \max_{\mathbf{u}_{t+1}} Q_{t+1}(\mathbf{x}_{t+1}, \mathbf{u}_{t+1}) \quad \forall (\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t) \in \mathcal{S}_{x_t} \times \mathcal{S}_{u_t} \quad (4.4)$$

dove

- $Q_t(\cdot, \cdot)$ è denominata *fattore Q* o funzione valore, ovvero il costo cumulato atteso risultante dall'applicazione della decisione di rilascio \mathbf{u}_t al tempo t in corrispondenza

dello stato \mathbf{x}_t e dall'adozione di decisioni ottime in ognuna delle successive transizioni di stato (politica greedy);

- \mathcal{S}_{x_t} è l'insieme degli stati;

- $\mathcal{S}_{\mathbf{u}_t}$ è l'insieme dei controlli.

Il caso deterministico stazionario ($T = 1$) è utile per descrivere il funzionamento dell'algoritmo, poiché la transizione di stato e il costo associato dipendono solamente dallo stato \mathbf{x}_t e dalla decisione \mathbf{u}_t .

Si può dimostrare [12] che la seguente sequenza di funzioni Q_h , definite per tutte le coppie $(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t) \in \mathcal{S}_x \times \mathcal{S}_u$

$$Q_0(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t) = 0 \quad (4.5a)$$

$$Q_h(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t) = g(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t) + \gamma \max_{\mathbf{u}_{t+1}} Q_{h-1}(\mathbf{x}_{t+1}, \mathbf{u}_{t+1}) \quad \forall h > 0 \quad (4.5b)$$

converge, all'infinito, alla funzione Q ottima $Q^*(\cdot)$ che risolve il problema deterministico e stazionario. Ipotizzando che la funzione $Q_{h-1}(\cdot)$ sia nota, il valore di $Q_h(\cdot)$ può essere calcolato per tutte le coppie stato-decisione $(\mathbf{x}_t^l, \mathbf{u}_t^l), l = 1, \dots, \#\mathcal{F}$, utilizzando la (4.5b) e il dataset di apprendimento \mathcal{F} . Il valore della cardinalità di \mathcal{F} ottenuto può essere utilizzato per raggiungere un'approssimazione continua $\hat{Q}_h(\cdot)$ di $Q_h(\cdot)$ sull'intero insieme stato-decisione $\mathcal{S}_x \times \mathcal{S}_u$ applicando un algoritmo di regressione (ovvero un fitting tramite un approssimatore di funzione) al set di addestramento

$$\mathcal{TS} = \{ \langle (\mathbf{x}_t^l, \mathbf{u}_t^l), Q_H(\mathbf{x}_t^l, \mathbf{u}_t^l) \rangle, l = 1, \dots, \#\mathcal{F} \} \quad (4.6)$$

dove le coppie $(\mathbf{x}_t^l, \mathbf{u}_t^l)$ sono gli input del regressore e i valori $Q_h(\mathbf{x}_t^l, \mathbf{u}_t^l)$ sono gli output del regressore. Sostituendo $Q_h(\cdot)$ con $\hat{Q}_h(\cdot)$ e applicando lo stesso ragionamento, le approssimazioni successive $\hat{Q}_{h+1}(\cdot), \hat{Q}_{h+2}(\cdot), \dots$ possono essere determinate in maniera iterativa.

Il fitted Q-iteration genera una politica stazionaria, ovvero un'unica legge di controllo della forma $\mathbf{u}_t = m(\mathbf{x}_t)$, che rappresenta la politica ottima per un sistema stazionario. Tuttavia, i sistemi naturali non sono affatto stazionari e quindi una politica periodica (ovvero una sequenza di $T - 1$ leggi di controllo) è molto più indicata per adattarsi alla variabilità stagionale. Un modo per estendere la procedura di fitted Q-iteration al caso non stazionario è quello di considerare il tempo come un componente del vettore di stato, che evolve guidato da una funzione di transizione di stato autonoma e deterministica: t è sempre seguito da $t + 1$. La notazione del dataset di apprendimento \mathcal{F} può essere riscritta come

$$\mathcal{F} = \{ \langle (t, \mathbf{x}_t)^l, \mathbf{u}_t^l, (t+1, \mathbf{x}_{t+1})^l, g_{t+1}^l \rangle, l = 1, \dots, \#\mathcal{F} \} \quad (4.7)$$

Tutte le proprietà della formulazione stazionaria sono conservate e la convergenza può essere dimostrata sotto le stesse ipotesi del caso precedente. Pertanto l'algoritmo di fitted Q-iteration applicato a questo nuovo set produce una politica approssimata periodica, composta da una sequenza di $T - 1$ leggi di controllo.

Una versione schematica dell'algoritmo di fitted Q-iteration modificato in questo modo è il seguente:

Input: un dataset \mathcal{F} di apprendimento e un algoritmo di regressione.

Inizializzazione:

Porre $h = 0$.

Porre $\hat{Q}_0(\cdot) = 0$ sull'intero spazio stato-decisione $\mathcal{S}_x \times \mathcal{S}_u$.

Iterazioni: ripetere finché la condizione di terminazione non è rispettata.

Porre $h = h + 1$.

Costruire il set di addestramento $\mathcal{TS} = \{ \langle i^l, o^l \rangle, l = 1, \dots, \#\mathcal{F} \}$ dove $i^l = ((t, \mathbf{x}_t)^l, \mathbf{u}_t^l)$ e $o^l = g_{t+1}^l + \gamma \max_{\mathbf{u}_{t+1}} \hat{Q}_{h-1}((t+1, \mathbf{x}_{t+1})^l, \mathbf{u}_{t+1}^l)$

Applicare l'algoritmo di regressione su TS per ottenere $\hat{Q}_h(\cdot)$, dalla quale deriva la politica \hat{p}_h .

Si può affermare che l'algoritmo del fitted Q-iteration sia un algoritmo RL di tipo batch, in quanto l'intero dataset di apprendimento \mathcal{F} è processato in modo batch, al contrario degli algoritmi RL tradizionali, che operano un aggiornamento incrementale della funzione valore utilizzando le tuple in maniera sequenziale. Le iterazioni possono essere fermate quando la differenza tra $\hat{Q}_h(\cdot)$ e $\hat{Q}_{h-1}(\cdot)$ scende al di sotto di una soglia prefissata, anche se questo criterio non assicura la convergenza con alcuni approssimatori di funzione (vedi Par. 4.1.3). Quando l'algoritmo termina, qualunque sia la condizione di terminazione selezionata, la politica finale \hat{p} è un'ap-

prossimazione della politica ottima p^* . La politica \hat{p}_h associata all' h -esima iterazione dell'algoritmo è composta da una sequenza di $T - 1$ leggi di controllo, ognuna delle quali insiste sull'orizzonte $[t, t + h)$. In altri termini, per ogni valore di h , l'algoritmo risolve un problema ricorsivo con passo h .

4.1.2 Il dataset di apprendimento

Tra i modi più semplici per generare il dataset di apprendimento vi è quello di utilizzare la serie storica delle transizioni del sistema in modo che l'algoritmo possa apprendere da questa. Per aumentare l'informazione, è possibile esplorare i controlli in prossimità di quelli storicamente applicati; il principale limite di questo approccio è che la politica sarà molto simile alla gestione attuale, con risultati scarsamente significativi per i sistemi che sono poco gestiti. La presenza di decisioni di pianificazione (decisioni che modificano la struttura del sistema) o la mancanza di gestione rende questa metodologia inapplicabile. L'approccio alternativo, seguito in questo lavoro, è la simulazione modellistica. Abbiamo creato il modello del sistema descritto nel Cap. 3: abbiamo modellizzato tutti i componenti ad eccezione degli afflussi a Itezhi-tezhi e a Kafue Gorge e dell'evaporazione sui serbatoi di Itezhi-tezhi, Kafue Flats e Kafue Gorge. In altri termini non si sono modellizzate le componenti che non sono influenzate dalle decisioni di rilascio del serbatoio di Itezhi-tezhi e di Kafue Gorge, adottando un approccio parzialmente *model free* [7]. Questo approccio offre un duplice vantaggio: da un lato permette di non modellizzare i componenti più complessi e che potrebbero portare ad una significativa presenza di errori nel modello, dall'altro è possibile utilizzare la serie storica con tutta la ricchezza di informazioni in essa contenute. Il procedimento usato è il seguente:

- descrizione modellistica del sistema per le parti influenzate dal controllo (Cap. 3);
- discretizzazione degli spazi di stato e di controllo (discretizzazioni invasi di Itezhi-tezhi, Kafue Flats e Kafue Gorge e controlli di Itezhi-tezhi e di Kafue Gorge);
- simulazione del sistema su un singolo passo temporale esplorando tutte le possibili combinazioni degli stati e dei controlli ed associando ad ogni passo temporale il valore degli indicatori (nella fase delle soluzioni del problema sono stati considerati gli indicatori $i^{U1+i^{U4}}$, i^{recess} , i^{U2});

- inserimento delle tuple generate tramite Matlab nell'ottimizzatore, per ottenere la politica ottima.

Discretizzazioni utilizzate

Nello scegliere le classi di stato e di controllo è necessario tenere presente due opposte esigenze: più è elevato il numero delle classi, più precisa sarà la soluzione ma cresceranno in modo significativo i tempi di calcolo. Le griglie non sono perfettamente uniformi, poiché è più improbabile ricadere in valori molto alti o molto bassi di livelli: per questo motivo le griglie possono essere più lasche man mano che ci si sposta verso valori alti o bassi del livello del pelo libero dei serbatoi. Le discretizzazioni adottate per i serbatoi sono mostrate in Tab. 4.1.

Itezhi-tezhi	Kafue Flats	Kafue Gorge
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
1005	975	972
1009	977	974
1015	979	975
1019	981	976
1023	985	979
1027		
1031		
1034		

Tabella 4.1: Valori di discretizzazione dei livelli per i serbatoi di Itezhi-tezhi, Kafue Flats e Kafue Gorge.

Le discretizzazioni dei controlli sono riportate in Tab. 4.2. I controlli del serbatoio di Kafue Gorge superano la portata massima turbinabile per permettere un rapido svuotamento del serbatoio ed evitare condizioni di rigurgito, che potrebbe risultare negativo per l'indicatore dell'agricoltura di recessione. I controlli dei due serbatoi al di sotto della portata massima turbinabile, corrispondono ad un periodo di funzionamento delle centrali di Itezhi-tezhi e di Kafue Gorge di 3, 6 o 12 ore, nell'arco della giornata; il controllo pari alla portata massima turbinabile, equivale al funzionamento delle centrali di 24 ore.

Itezhi-tezhi	Kafue Gorge
$m^3 s^{-1}$	$m^3 s^{-1}$
0	0
39	31.5
78	63
156	126
312	252
500	500
1500	1500
	3000

Tabella 4.2: Valori di discretizzazione dei controlli per i serbatoi di Itezhi-tezhi e Kafue Gorge.

4.1.3 L'approssimatore di funzione

In via di principio, l'algoritmo di fitted Q-iteration può essere combinato con qualsiasi approssimatore di funzioni, basato sui minimi quadrati e progettato per problemi di regressione. In pratica, l'approssimatore adottato dovrebbe possedere le seguenti caratteristiche desiderabili [12]:

1. *Flessibilità di modellizzazione.* Per problemi molto semplici, che riguardano un singolo serbatoio gestito con un unico obiettivo, la classe di funzioni, alla quale appartengono le funzioni Q da approssimare, può essere riconosciuta a priori, entro certi limiti (ad esempio per il controllo delle piene, deve essere una funzione monotona crescente con l'invaso). Tuttavia, quando si ha a che fare con reti di serbatoi e/o problemi multi-obiettivo, la forma della funzione può essere completamente imprevedibile. Di conseguenza, l'approssimatore di funzione deve essere in grado di adattarsi alla struttura del problema.
2. *Efficienza computazionale.* L'algoritmo di regressione viene eseguito ad ogni passo d'iterazione del fitted Q-iteration. Deve, pertanto, assicurare approssimazioni accurate, senza aggiungere troppo ai requisiti di calcolo totali. Inoltre, non deve essere permesso alcun tipo di calibrazione dei parametri dell'approssimatore di funzione da parte dell'utente durante il processo (si parla di approssimazione completamente automatica).

Alcuni approssimatori parametrici di funzione riescono a garantire una grande flessibilità di modellizzazione; le reti neurali artificiali, ad esempio, sono in grado di approssimare qualsiasi funzione continua a più variabili a qualunque grado di accuratezza desiderato. Questa flessibilità, tuttavia, ha un prezzo, in quanto si riflette spesso in un elevato numero di parametri che richiedono una calibrazione esplicita, e quindi vanno ad influire sull'efficienza di calcolo [8] e aumentano il rischio di sovra-parametrizzazione. All'aumentare della grandezza del problema, le reti neurali richiedono sempre più neuroni, incrementando di conseguenza il costo in termini di potenza di calcolo nella fase di addestramento della politica. Gli approssimatori di funzione non parametrici, in particolare i metodi basati sugli alberi, assicurano flessibilità di modellizzazione e, allo stesso tempo, efficienza computazionale, poiché non richiedono una stima parametrica tradizionale nel loro processo di costruzione. Infatti, i metodi basati su alberi forniscono stime non parametriche fondate su una divisione binaria ricorsiva del dataset di addestramento \mathcal{TS} (algoritmo di costruzione dell'albero). Al primo passaggio, lo spazio degli input (o radice) è partizionato in due sottoinsiemi (nodi), applicando a \mathcal{TS} una regola di divisione (splitting rule) appropriata. L'operazione viene ripetuta in via iterativa sui due sottoinsiemi risultanti da ogni divisione, fino a che una data condizione di terminazione risulta essere soddisfatta. Ad ogni sottoinsieme della partizione finale (foglia) viene associato un valore dell'output o una funzione dell'input (regola di associazione). In alcuni metodi il processo di costruzione dell'albero viene ripetuto più volte, per costruire una foresta di alberi, e i valori stimati tramite gli alberi vengono aggregati, secondo una certa regola di aggregazione, per produrre la stima finale.

Capitolo 5

L'esplorazione della frontiera di Pareto e stima degli effetti

5.1 Generazione della frontiera di Pareto

E' praticamente impossibile calcolare gli infiniti punti che costituiscono la frontiera di Pareto, poiché sarebbe necessario risolvere il problema di controllo in corrispondenza di infinite combinazioni di pesi degli indicatori. E' sufficiente calcolare e graficare un numero finito di punti significativi della frontiera e intuire da essi la forma dell'intera frontiera. Per raggiungere tale scopo si è risolto il problema di controllo per tutte le combinazioni di pesi, riportate in Tab. 5.1.

Alternativa	i^{U1+U4}	i^{U2}	i^{recess}
1	100	0	0
2	0	100	100
3	0	0	100
4	50	50	0
5	50	0	50
6	0	50	50
7	20	60	40
8	5	50	45
9	10	50	40

Tabella 5.1: Pesi percentuali degli indicatori, utilizzati per la creazione della frontiera di Pareto.

L'algoritmo di ottimizzazione è stato alimentato con un dataset di tuple creato considerando l'arco temporale 1 gennaio 1996 - 31 dicembre 2005 (taratura); per verificare la validità dei risultati delle ottimizzazioni per periodi temporali differenti, è stato simulato il sistema sul periodo 1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995 (validazione), oltre che sull'arco temporale usato nell'ottimizzazione. La simulazione è stata eseguita a passo giornaliero con decisioni di rilascio assunte giornalmente, interrogando la politica ottima decadica. I valori degli indicatori, calcolati tramite simulazione sull'arco temporale della taratura, sono riportati in Tab. 5.2, mentre quelli del periodo di validazione in Tab. 5.3.

Alternativa	$i^{U1} + i^{U4}$	i^{U2}	i^{recess}
	MW	$(m^3 s^{-1})^2$	$(m^2)^2$
Storico	1.435E+07	1.080E+04	2.007E+18
1	2.209E+07	2.879E+04	2.043E+18
2	6.456E+06	5.005E+03	2.772E+18
3	5.912E+06	4.952E+04	1.308E+17
4	1.372E+07	2.978E+04	6.679E+17
5	1.974E+07	3.021E+04	1.854E+18
6	1.126E+07	5.617E+03	5.856E+17
7	2.131E+07	1.361E+04	2.225E+18
8	1.449E+07	1.628E+04	7.330E+17
9	1.965E+07	5.890E+03	1.045E+18
Utopia	2.209E+07	5.005E+03	1.308E+17

Tabella 5.2: Valori medi degli indicatori ottenuti nel periodo di taratura (1 gennaio 1996 - 31 dicembre 2005), con decisioni di rilascio prese giornalmente.

Le frontiere di Pareto tridimensionali per la taratura e la validazione sono rappresentate rispettivamente in Fig. 5.1 e in Fig. 5.2.

E' difficile analizzare una frontiera tridimensionale; per migliorare la visualizzazione conviene proiettarla su un grafico bidimensionale: abbiamo creato un grafico con due soli indicatori ($i^{U1} + i^{U4}$, i^{recess}) e inserito la terza dimensione (i^{U2}) come diametro dei cerchi nel piano cartesiano (Figg. 5.6, 5.7).

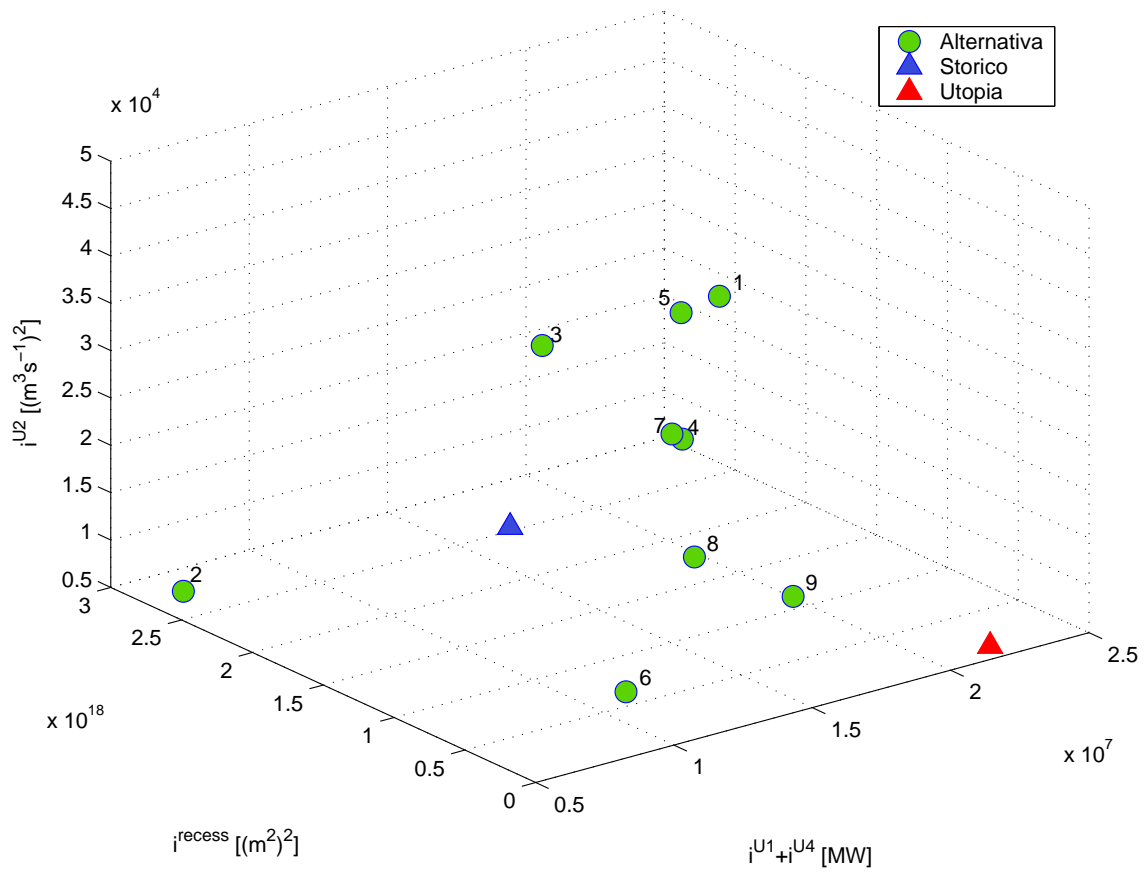


Figura 5.1: Frontiera d Pareto per il periodo di taratura (1 gennaio 1996 - 31 dicembre 2005).

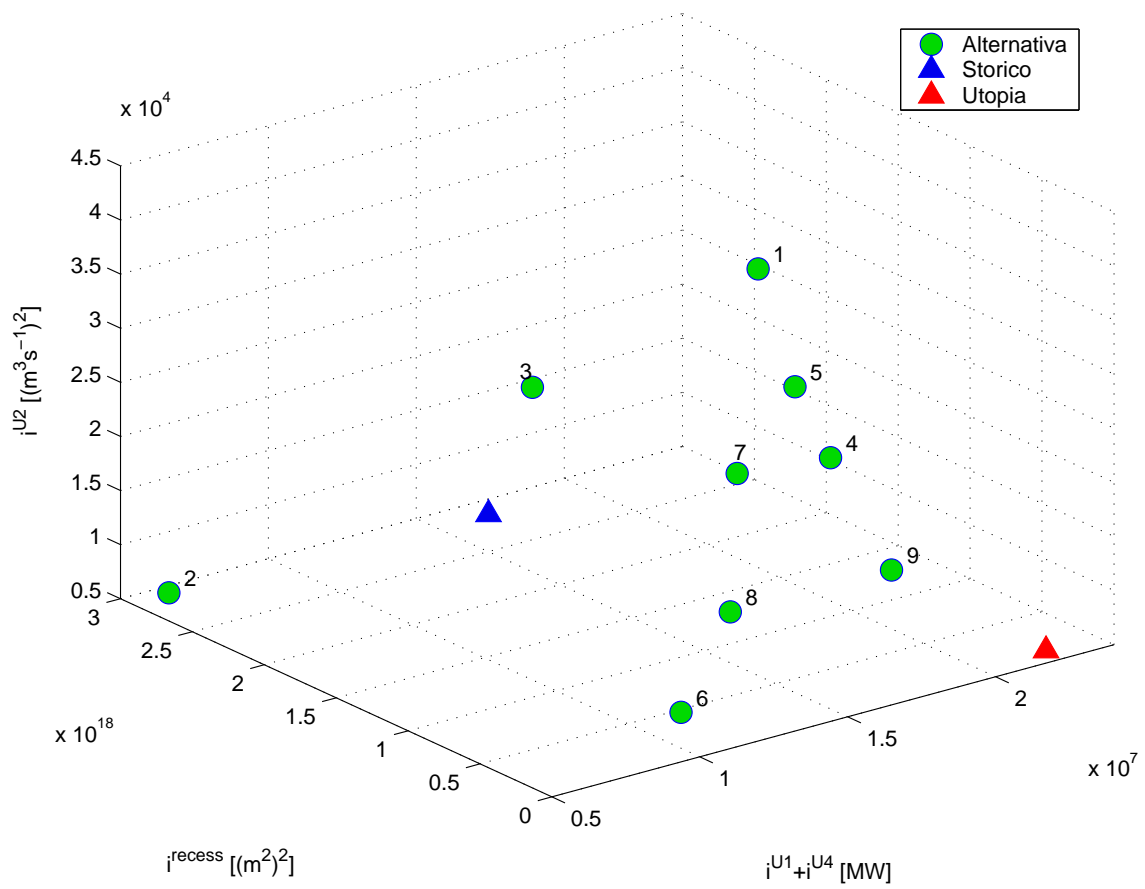


Figura 5.2: Frontiera d Pareto per il periodo di validazione (1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995).

Alternativa	$i^{U1} + i^{U4}$	i^{U2}	i^{recess}
	MW	$(m^3s^{-1})^2$	$(m^2)^2$
Storico	1.369E+07	1.109E+04	2.228E+18
1	2.210E+07	2.842E+04	2.084E+18
2	6.107E+06	5.394E+03	2.891E+18
3	4.742E+06	4.255E+04	8.149E+16
4	1.639E+07	2.544E+04	4.044E+17
5	1.864E+07	2.599E+04	1.116E+18
6	1.139E+07	5.541E+03	4.159E+17
7	2.103E+07	1.076E+04	2.009E+18
8	1.471E+07	1.030E+04	7.560E+17
9	2.056E+07	9.324E+03	8.391E+17
Utopia	2.210E+07	5.394E+03	8.149E+16

Tabella 5.3: Valori medi degli indicatori ottenuti nel periodo di validazione (1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995), con decisioni di rilascio prese giornalmente.

5.2 Analisi della frontiera di Pareto

Riguardo alle alternative estreme¹, si assiste ad un aumento significativo (54% in taratura e 61% in validazione) dell'indicatore idroelettrico ($i^{U1} + i^{U4}$); in Fig. 5.3 sono evidenziate le traiettorie della produzione idroelettrica dell'alternativa 1 e di quella storica, sull'orizzonte temporale della validazione.

L'indicatore riguardante il rilascio da Itezhi-tezhi (i^{U2}) migliora del 54% in taratura e del 51% in validazione, se si confronta l'alternativa 2 con la situazione storica (in Fig. 5.4 sono mostrate le traiettorie degli afflussi al serbatoio di Itezhi-tezhi, dei rilasci storici e generati dall'alternativa 2, in validazione).

L'alternativa 3 permette un notevole miglioramento (93% in taratura e 96% in validazione) dell'indicatore i^{recess} : le traiettorie del livello² delle Kafue Flats generate dall'alternativa 3 sono molto più simili alle traiettorie del regime naturale, rispetto a quelle storiche (in Fig. 5.5 è mostrato il confronto delle traiettorie sul periodo di validazione).

¹Alternative che presentano un peso 100 su un indicatore e 0 sugli altri.

²La superficie delle Kafue Flats, considerata nell'indicatore i^{recess} , è funzione monotona crescente del livello.

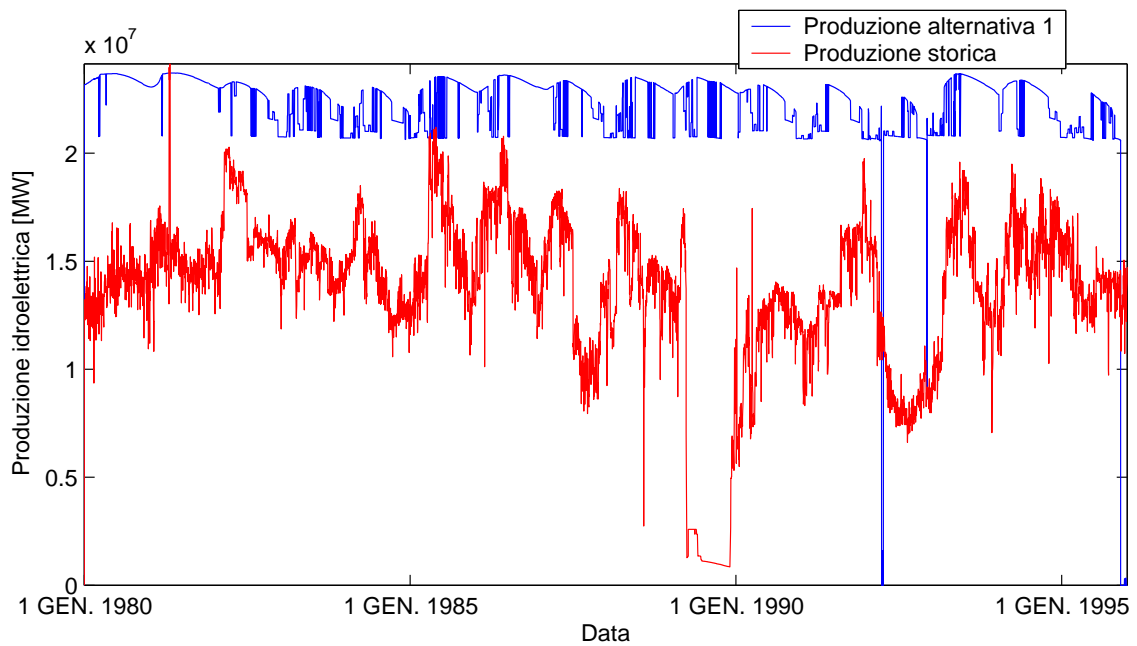


Figura 5.3: Confronto tra la produzione idroelettrica del sistema, generata dall'alternativa 1 e quella storica, nel periodo di validazione (1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995).

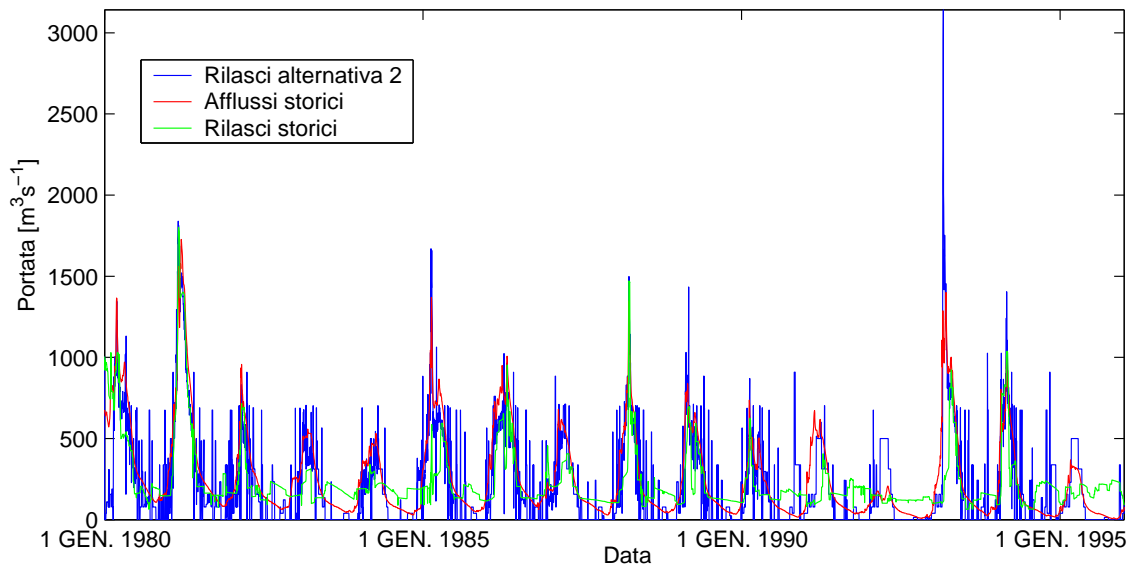


Figura 5.4: Confronto tra rilasci dal serbatoio di Itezhi-tezhi dell'alternativa 2, afflussi e rilasci storici, nel periodo di validazione (1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995).

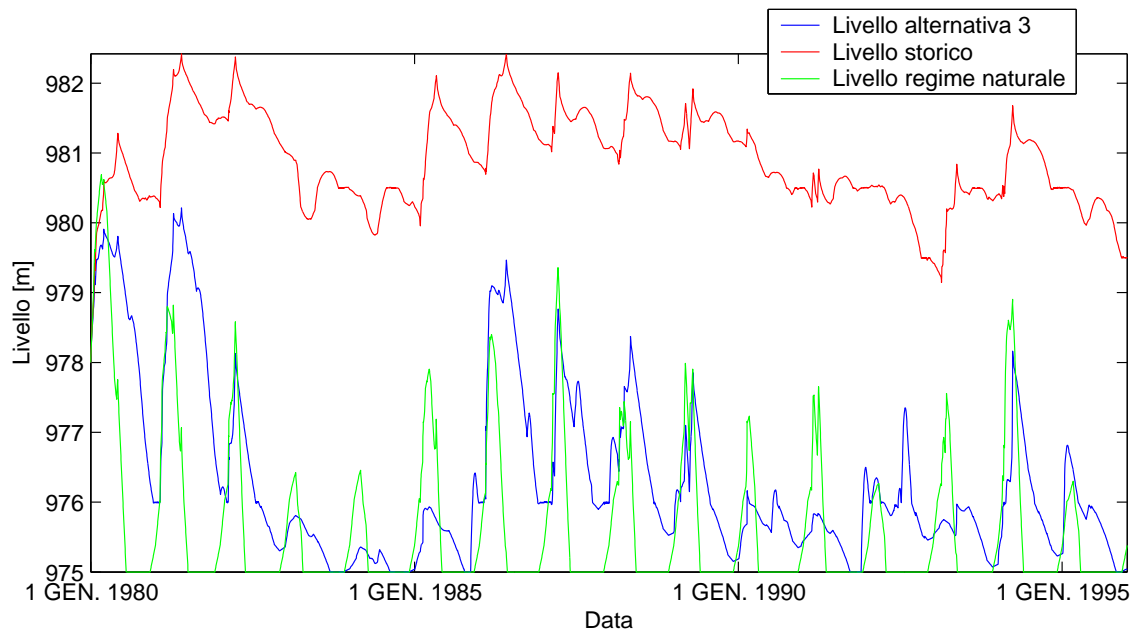


Figura 5.5: Confronto tra i livelli storici delle Kafue Flats, i livelli generati dall'alternativa 3 e i livelli del regime naturale, nel periodo di validazione (1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995).

Dai grafici si nota che il punto individuato dai valori storici non appartiene alla frontiera di Pareto; l'alternativa "storico" non è efficiente, poiché è dominata dall'alternativa 9, nel periodo di taratura e dalle alternative 7 e 9, sull'orizzonte temporale di validazione. L'alternativa 9 risulta particolarmente interessante, pertanto verrà analizzata nel Par. 5.3.

Per approfondire l'analisi abbiamo confrontato le simulazioni giornaliere degli estremi e dell'alternativa 9 per il periodo di validazione, ottenute con la decisione di rilascio presa ogni giorno, con le simulazioni con decisione di rilascio costante per tutta la decade. I risultati delle simulazioni, riportati in Tab. 5.4, evidenziano che si ha un miglioramento delle prestazioni del sistema se si interroga giornalmente la politica ottima decadica, anziché mantenere la decisione di rilascio invariata per tutta la decade.

5.3 Alternativa 9

L'alternativa 9 risulta dominante rispetto alla regolazione storica, riguardo ai tre obiettivi considerati nell'ottimizzazione, sia nel periodo di taratura che di validazione. Il maggiore miglioramento dell'indicatore della produzione idroelettrica

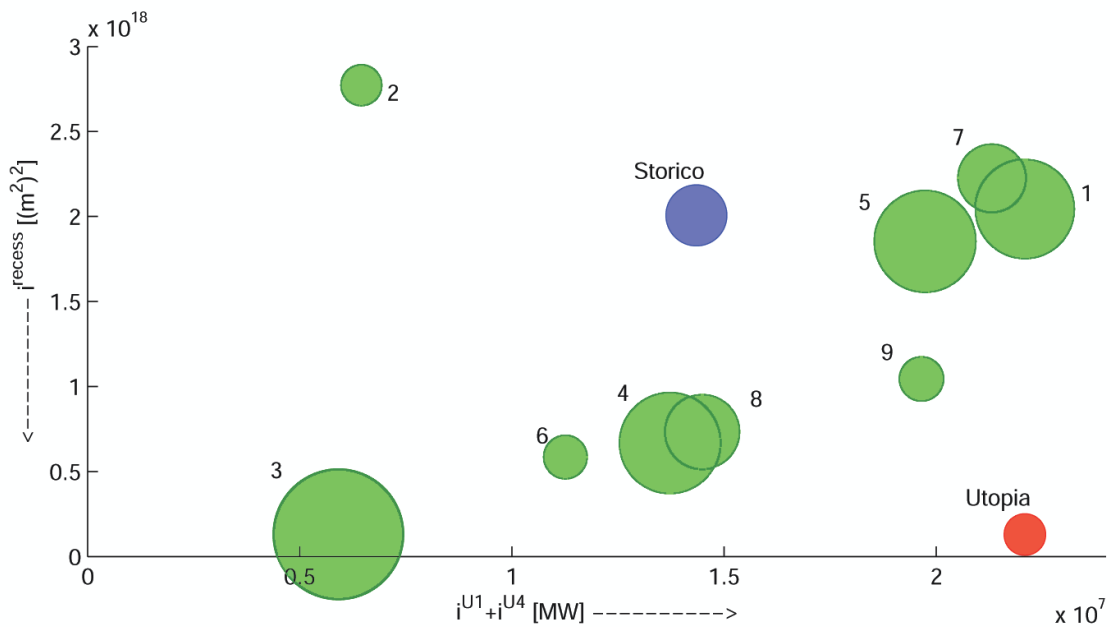


Figura 5.6: Proiezione della frontiera di Pareto su grafico bidimensionale per il periodo di taratura (1 gennaio 1996 - 31 dicembre 2005). I numeri indicano le alternative; il verso delle frecce indica se l'indicatore è da massimizzare o minimizzare; la dimensione dei cerchi è da minimizzare, poiché si riferisce all'indicatore i^{U2} .

Alternativa	$i^{U1} + i^{U4}$	i^{U2}	i^{recess}
	MW	$(m^3 s^{-1})^2$	$(m^2)^2$
1 giorn	2.210E+07	2.842E+04	2.084E+18
1 dec	2.173E+07	3.074E+04	1.912E+18
2 giorn	6.107E+06	5.394E+03	2.891E+18
2 dec	5.943E+06	5.718E+03	3.241E+18
3 giorn	4.742E+06	4.225E+04	8.149E+16
3 dec	1.406E+07	2.144E+04	6.816E+17
9 giorn	2.056E+07	9.324E+03	8.391E+17
9 dec	1.923E+07	1.058E+04	1.156E+18

Tabella 5.4: Valori medi degli indicatori ottenuti nel periodo di validazione (1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995), con decisioni di rilascio prese giornalmente (giorn) e decadicamente (dec).

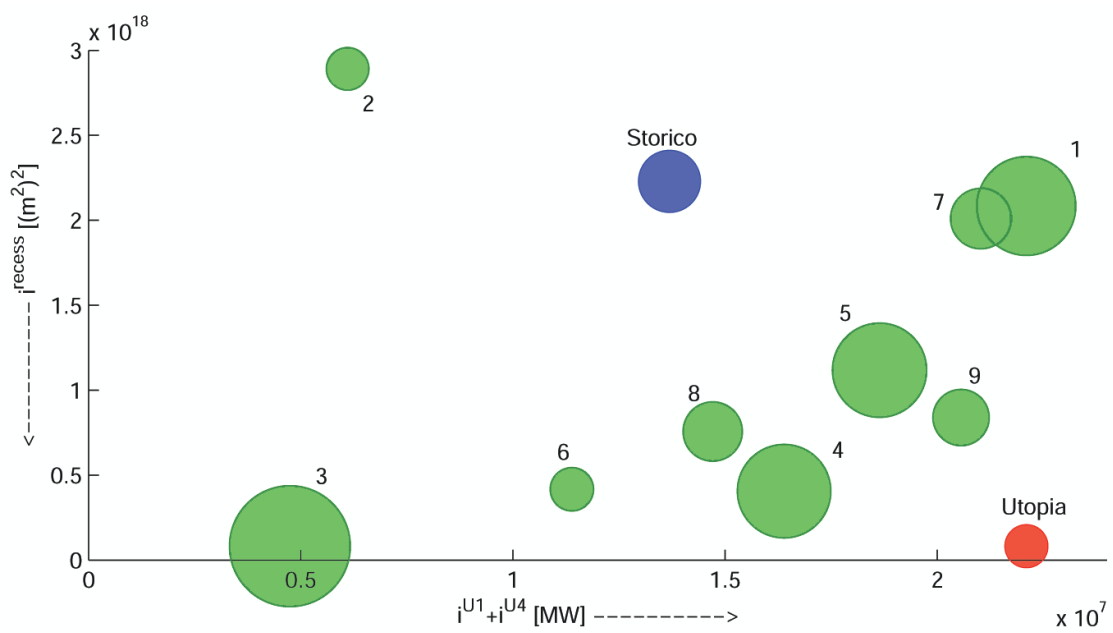


Figura 5.7: Proiezione della frontiera di Pareto su grafico bidimensionale per il periodo di validazione (1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995). I numeri indicano le alternative; il verso delle frecce indica se l'indicatore è da massimizzare o minimizzare; la dimensione dei cerchi è da minimizzare, poiché si riferisce all'indicatore i^{U2} .

delle centrali di Itezhi-tezhi e di Kafue Gorge si verifica nel periodo di validazione, dove si assiste ad un aumento del 50 %, mentre in taratura il miglioramento è del 37 %. L'indicatore che esprime lo scostamento tra l'afflusso al serbatoio di Itezhi-tezhi e il rilascio dallo stesso (i^{U2}) migliora del 45 % in taratura e del 16 % in validazione; infine l'indicatore riguardante l'agricoltura di recessione (i^{recess}) presenta un consistente miglioramento sia in taratura che in validazione: rispettivamente del 48 % e del 62 %. Per un'analisi adeguata non è possibile limitarsi al valore medio su tutto l'orizzonte temporale degli indicatori usati nell'ottimizzazione, ma è necessario confrontare le traiettorie di tutti gli indicatori analizzati nel Cap. 2. Di seguito sono confrontate le traiettorie degli indicatori per il periodo di validazione, che è più rappresentativo di quello della taratura.

5.3.1 Idroelettrico

I due indicatori i^{U1} e i^{U4} esprimono la produzione idroelettrica del serbatoio di Itezhi-tezhi e di Kafue Gorge; confrontando le traiettorie (Figg. 5.8, 5.9) si nota che l'alternativa 9 presenta molta più variabilità rispetto allo storico, soprattutto riguardo alla produzione del serbatoio di Itezhi-tezhi, poiché l'alternativa dà molto peso agli indicatori i^{U4} e i^{recess} , che richiedono una variazione dei controlli del serbatoio di Itezhi-tezhi. La traiettoria dell'indicatore i^{U4} mostra che la produzione idroelettrica è quasi costante con dei crolli: la decisione di rilascio è pari o superiore alla portata massima turbinabile quando il livello dell'invaso di Kafue Gorge è superiore all'estremo inferiore della fascia di regolazione ed è pari a $0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ quando si è al di sotto di tale estremo.

5.3.2 Canna da zucchero e soia

L'indicatore i^{U3} riguarda il deficit irriguo: con la gestione storica non si verificava, mentre con l'alternativa 9 il deficit medio sull'orizzonte di validazione è pari a $0.74 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Per poter analizzare più dettagliatamente il deficit, in Fig. 5.10 è riportata la traiettoria della percentuale di deficit rispetto alla domanda irrigua. Sull'orizzonte temporale di 5843 giorni si verificano le seguenti condizioni di deficit, in base alla soglia percentuale di deficit:

- per 219 giorni il deficit supera la soglia del 30%;
- per 160 giorni il deficit supera la soglia del 50%;

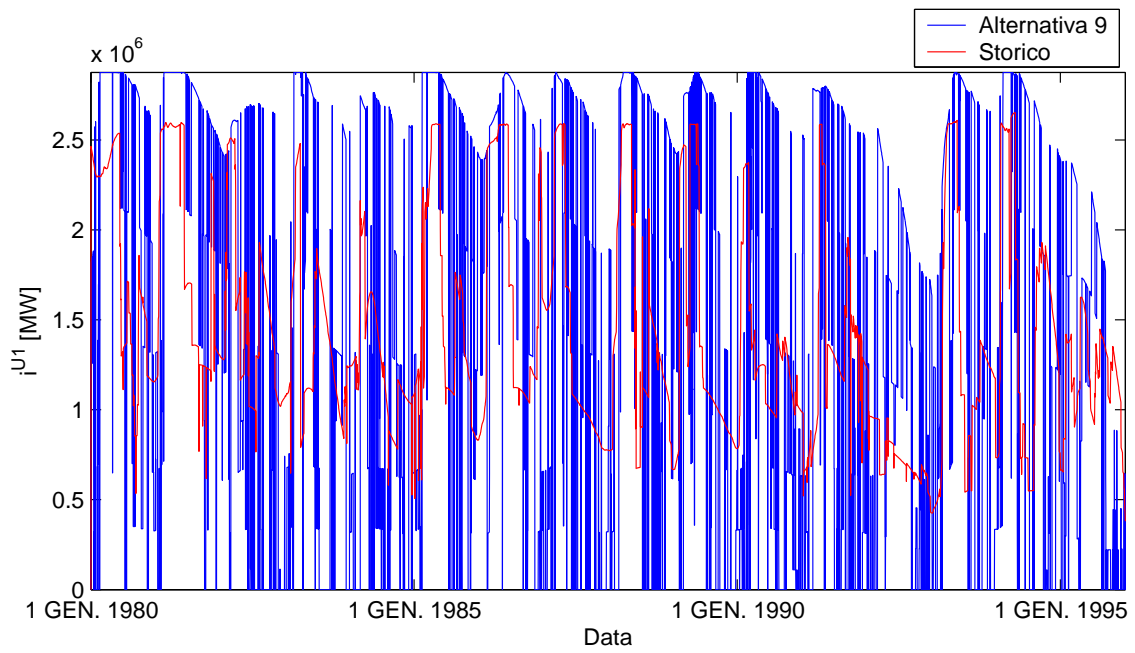


Figura 5.8: Traiettoria dell'indicatore i^{U1} nel periodo: 1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995.

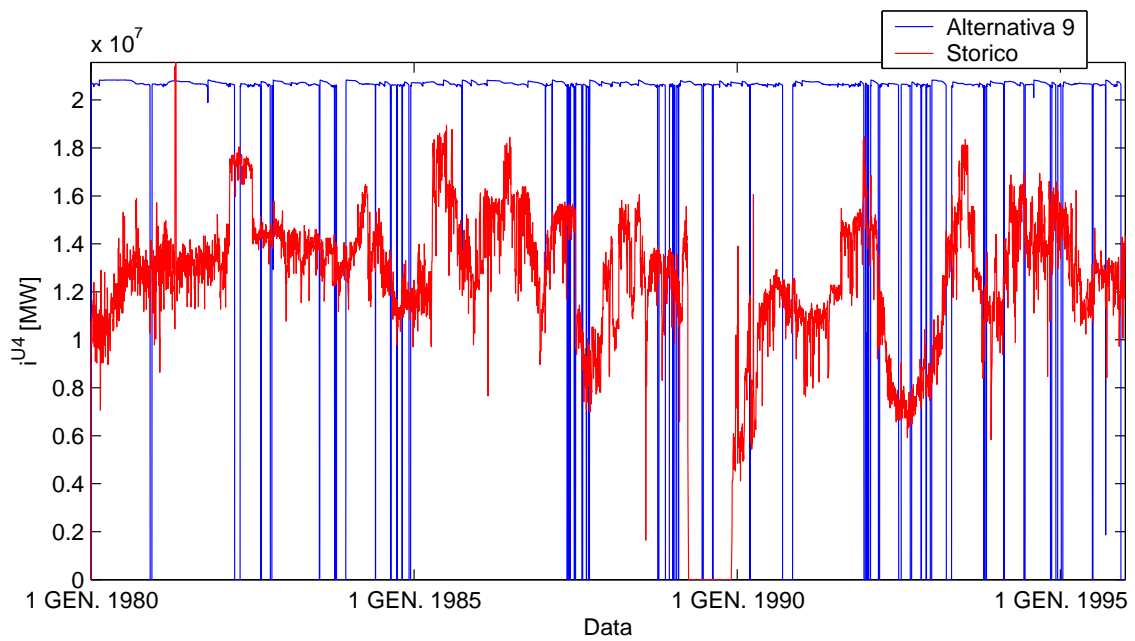


Figura 5.9: Traiettoria dell'indicatore i^{U4} nel periodo: 1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995.

- per 64 giorni il deficit supera la soglia dell' 80%.

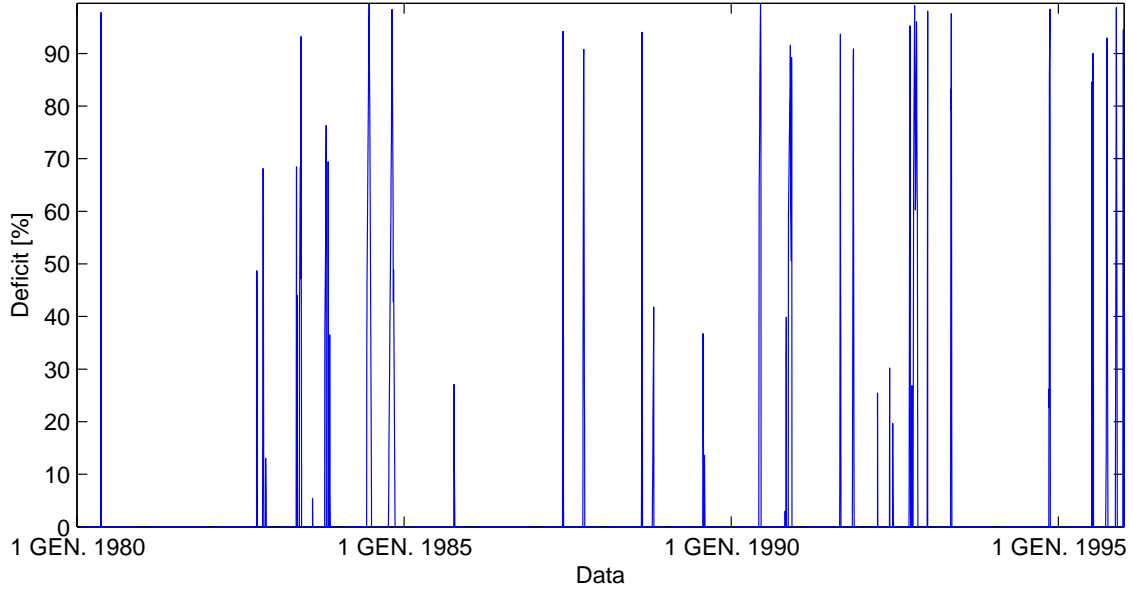


Figura 5.10: Traiettorie del deficit irriguo generato dall'alternativa 9, nel periodo: 1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995.

Per poter ovviare a questo deficit è possibile imporre un DMV dal serbatoio di Itezhi-tezhi di poco superiore alla massima domanda irrigua³. Eseguendo le simulazioni per l'alternativa 9 con DMV costante, pari a $35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ si assiste, oltre all'annullamento del deficit irriguo, ad un miglioramento della produzione idroelettrica e dell'indicatore sul rilascio rispetto alla simulazione senza DMV (Tab. 5.5).

Alternativa	$i^{U1} + i^{U4}$	i^{U2}	i^{recess}
	<i>MW</i>	$(\text{m}^3\text{s}^{-1})^2$	$(\text{m}^2)^2$
9 no DMV	2.056E+07	9.324E+03	8.391E+17
9 DMV	2.113E+07	8.649E+03	1.237E+18

Tabella 5.5: Valori medi degli indicatori ottenuti nel periodo di validazione (1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995), in assenza del vincolo di DMV dal serbatoio di Itezhi-tezhi (no DMV) o in sua presenza (DMV).

³Non abbiamo considerato l'attuale DMV come vincolo; le informazioni sull'attuale DMV sono state inserite nell'indicatore i^{U2} (Par. 2.4).

5.3.3 Agricoltura di recessione

L'agricoltura di recessione, rappresentata dall'indicatore i^{recess} , ottiene un beneficio consistente dalla regolazione secondo l'alternativa 9: dal confronto delle traiettorie storico-simulate (Fig. 5.11) si nota che l'indicatore dell'alternativa, a parte un significativo picco iniziale, è quasi sempre al di sotto dell'indicatore storico.

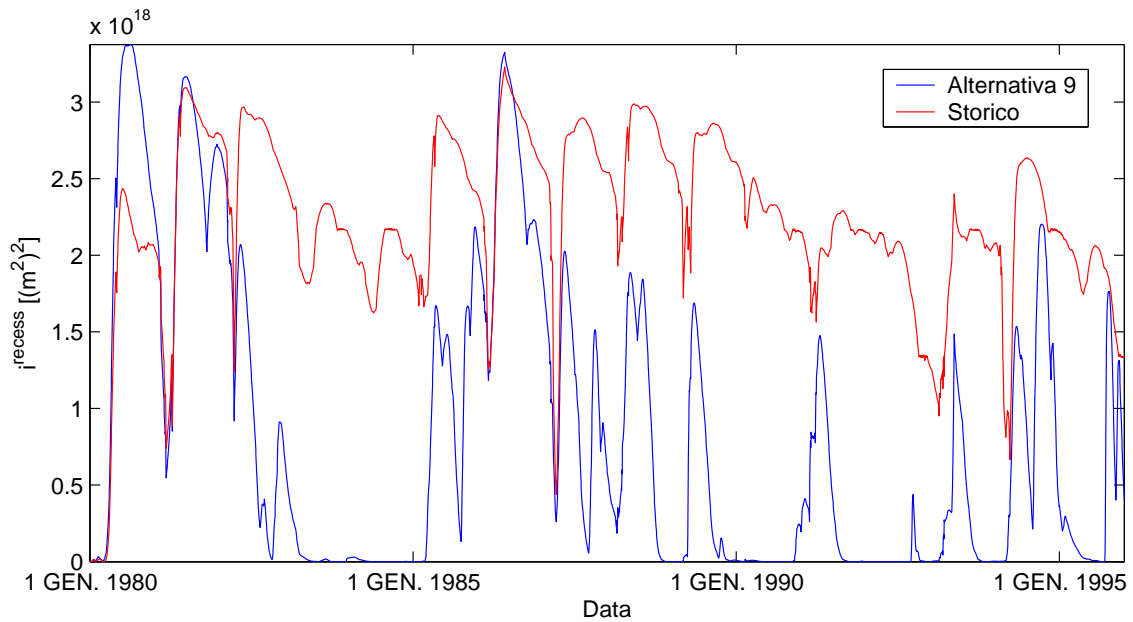


Figura 5.11: Traiettoria dell'indicatore i^{recess} nel periodo: 1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995.

5.3.4 Kafue Flats

Le traiettorie dell'indicatore i^{U2} sono mostrate in Fig. 5.13. Per poter apprezzare meglio il comportamento dell'alternativa riguardo a questo indicatore, è necessario presentare un grafico che visualizzi gli afflussi al serbatoio di Itezhi-tezhi, rilasci dell'alternativa 9 e rilasci storici su un anno (Fig. 5.12): i rilasci dell'alternativa 9 si adeguano meglio al picco ma mostrano una maggiore variabilità rispetto ai rilasci storici, a causa della discretizzazione dei controlli.

Riguardo alle condizioni dell'ecosistema e della biodiversità dell'area umida immediatamente a monte del serbatoio di Kafue Gorge, l'alternativa 9 offre un significativo miglioramento, poiché l'indicatore associato i^{KF1} è lo stesso dell'agricoltura di recessione i^{recess} e la traiettoria dell'indicatore è rappresentata in Fig. 5.11. All'avifauna acquatica la regolazione storica offre maggiori possibilità, poiché l'area

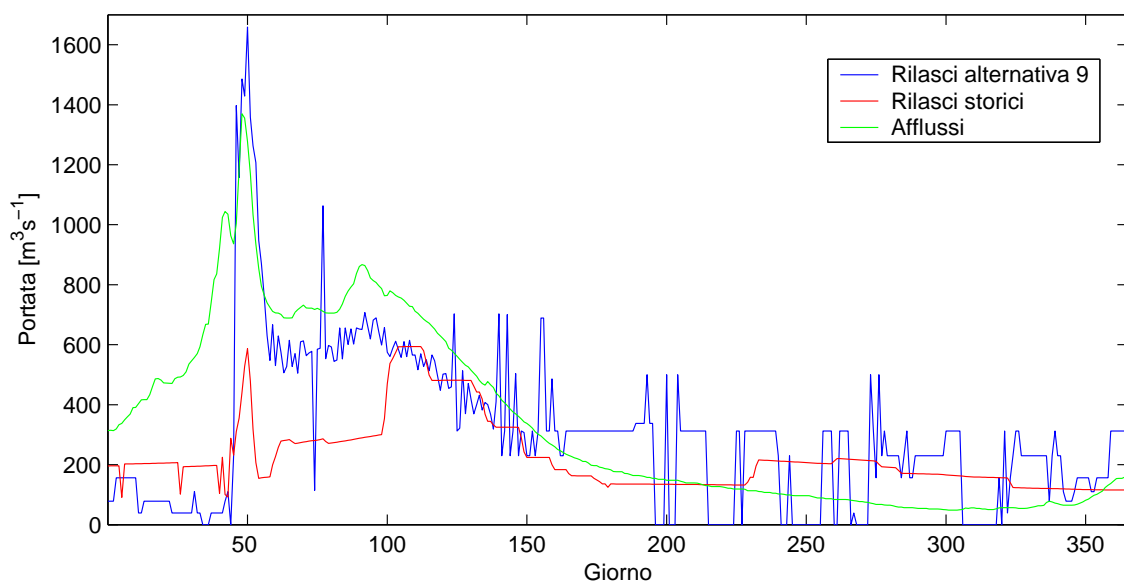


Figura 5.12: Confronto tra rilasci dal serbatoio di Itezhi-tezhi dell'alternativa 9, afflussi e rilasci storici (1 gennaio 1985 - 31 dicembre 1985).

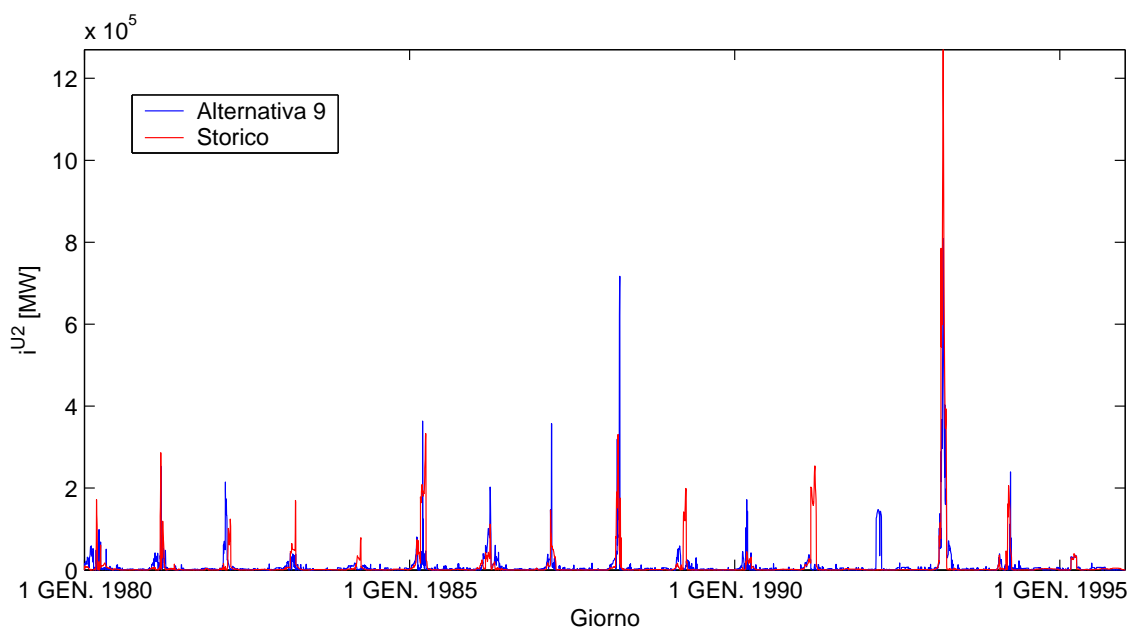


Figura 5.13: Traiettoria dell'indicatore i^{U2} nel periodo: 1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995.

allagata è più costante (Fig. 5.14). Un discorso analogo vale anche per la fauna ittica: la regolazione storica presenta livelli delle Kafue Flats più elevati e sempre sopra la soglia minima, oltre la quale i pesci possono nutrirsi, riprodursi e migrare senza difficoltà (Figg. 5.15, 5.16). Non è da escludere, però, riguardo ai pesci, il seguente fenomeno ecologico: condizioni di stabile allagamento, che favoriscono la vita dei pesci, possono portare alla predominanza di una specie dominante, favorita dalle condizioni ambientali stabili [18].

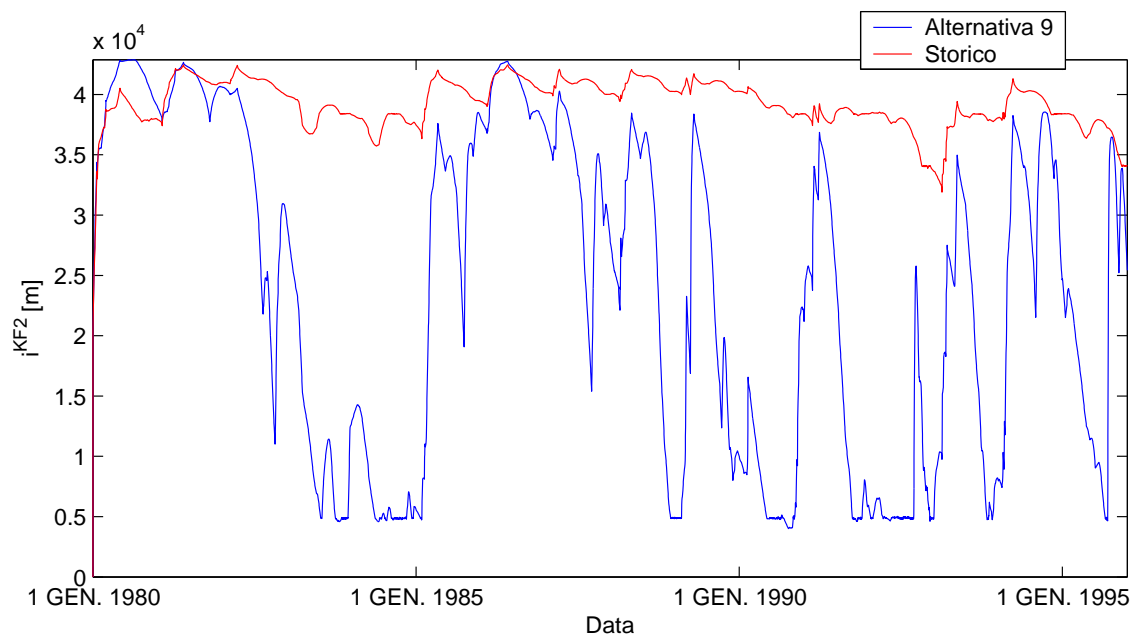


Figura 5.14: Traiettoria dell'indicatore i^{KF2} nel periodo: 1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995.

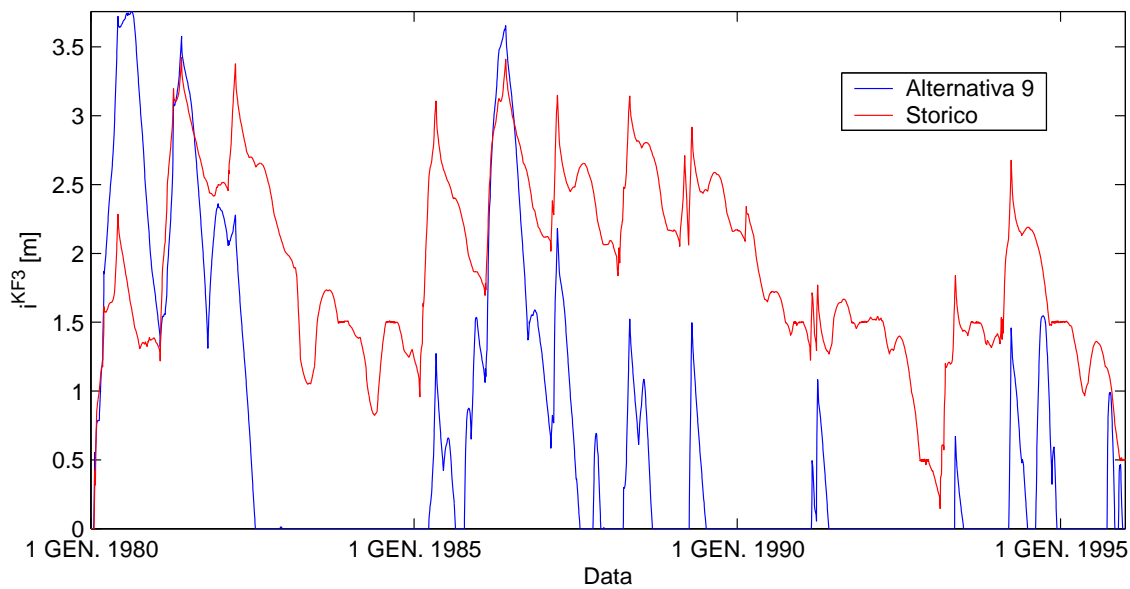


Figura 5.15: Traiettoria dell'indicatore i^{KF3} nel periodo: 1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995.

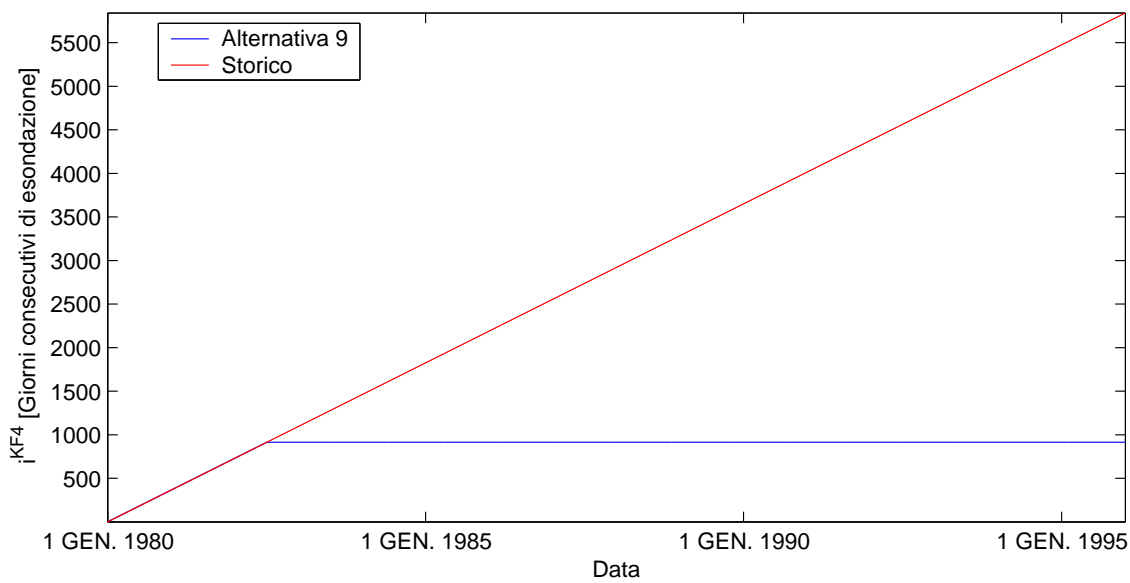


Figura 5.16: Traiettoria dell'indicatore i^{KF4} nel periodo: 1 gennaio 1980 - 31 dicembre 1995.

Conclusioni e possibili sviluppi

La presente tesi si è occupata del sistema del Kafue, un affluente dello Zambesi. Lungo il corso del Kafue sono state costruite, negli anni '70, due importanti dighe che hanno permesso la produzione di energia idroelettrica: la diga di Kafue Gorge e quella di Itezhi-tezhi. Attualmente i serbatoi, formati per la costruzione delle dighe, sono gestiti tramite *rule-curve*, con il solo scopo della produzione idroelettrica. Tra i due serbatoi si trovano le Kafue Flats, una vasta area umida di elevato pregio ambientale, che sono state danneggiate dal punto di vista ecologico dalla costruzione delle due dighe, poiché è stata modificata l'alternanza delle inondazioni e dei periodi di secca, esistente prima della costruzione delle dighe.

Lo scopo di questo lavoro è il progetto della politica di gestione congiunta dei serbatoi di Itezhi-tezhi e di Kafue Gorge in modo da conciliare la produzione idroelettrica con le esigenze dell'ambiente e dell'agricoltura di recessione delle Kafue Flats.

Sintesi dei risultati

Il problema gestionale è stato affrontato come un problema a molti obiettivi: la massimizzazione della produzione idroelettrica del sistema, la minimizzazione della distanza tra il rilascio dal serbatoio di Itezhi-tezhi e il suo afflusso e la minimizzazione della distanza tra la superficie delle Kafue Flats per effetto della regolazione e quella conseguente alle condizioni naturali.

La progettazione delle politiche di controllo ha richiesto l'identificazione di un modello del sistema, in particolare, per contenere i tempi di calcolo, si è drasticamente semplificata la rappresentazione delle Kafue Flats in modo da renderla concentrata in un serbatoio virtuale con una sola variabile di stato. Abbiamo ipotizzato che lo scambio di acqua tra il fiume e le Kafue Flats, che è in realtà distribuito, avvenga immediatamente a monte del serbatoio di Kafue Gorge e abbiamo model-

lizzato l'asta fluviale che va dal serbatoio di Itezhi-tezhi a quello di Kafue Gorge come un canale in cui la propagazione delle portate è del tipo *plug flow*. Questa semplificazione ci ha permesso comunque di tener conto del fenomeno del rigurgito: quando i livelli di Kafue Gorge sono elevati si alza il livello del fiume ed è favorita l'inondazione delle Kafue Flats.

Le politiche sono state ottenute con un processo di ottimizzazione a passo decadico, tramite l'algoritmo di fitted Q-iteration. In questo modo si è ottenuta una funzione continua rispetto alle variabili di stato ed al tempo. E' stato possibile eseguire la simulazione con decisioni di rilascio assunte giornalmente, anziché invariate per tutta la decade. Con il metodo dei pesi è stata esplorata la frontiera di Pareto, della quale sono stati progettati nove punti corrispondenti ad altrettante alternative.

Di particolare interesse risulta l'alternativa 9 poiché, sia considerando l'orizzonte temporale di taratura sia quello di validazione, domina la gestione storica. Le prestazioni del sistema gestito secondo la politica generata dall'alternativa 9 permettono, infatti, nel periodo di validazione, un miglioramento della produzione idroelettrica pari al 50%, dell'indicatore sul rilascio da Itezhi-tezhi del 16% e dell'indicatore riguardante la superficie delle Kafue Flats del 62%. Con questa alternativa è, quindi, possibile aumentare significativamente la produzione idroelettrica migliorando contemporaneamente le condizioni ambientali, rappresentate dai due indicatori citati.

Questa politica di controllo non presenta solo dei vantaggi. Il suo aspetto più critico riguarda il deficit irriguo: la gestione storica, a differenza dell'alternativa 9, non produceva deficit per via del vincolo del DMV sui rilasci (pari a $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a marzo e $25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nel resto dell'anno) dal serbatoio di Itezhi-tezhi, che garantiva, insieme all'afflusso proprio delle Kafue Flats, di soddisfare la domanda. In questo lavoro, per aumentare lo spazio di ricerca delle politiche, non abbiamo considerato il vincolo del DMV dal serbatoio di Itezhi-tezhi, ma abbiamo preferito includere le indicazioni nell'indicatore relativo ai rilasci da Itezhi-tezhi. Si è dimostrato come sia sufficiente introdurre un DMV pari a $35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ per eliminare il deficit sull'orizzonte temporale di validazione e conseguentemente si modificano le prestazioni degli altri indicatori. Migliorano l'indicatore della produzione idroelettrica e quello relativo al rilascio da Itezhi-tezhi, mentre l'indicatore relativo alle superfici peggiora, pur restando migliore rispetto alla gestione storica.

Limiti e possibili sviluppi

I risultati ottenuti sono positivi, anche se l'aumento notevole di produzione idroelettrica può far sorgere il dubbio che vi siano alcune imprecisioni modellistiche non dipendenti dalla nostra volontà; le principali incertezze riguardano:

- scarsità di dati delle Kafue Flats, che ci ha costretto ad un laborioso lavoro di stima dei parametri riguardanti lo scambio di acqua tra il fiume Kafue e il serbatoio virtuale, usato per rappresentare le Kafue Flats e che non è stato possibile validare direttamente (vedi Par. 3.5, Par. 3.6);
- altre domande idriche presenti oltre il serbatoio di Kafue Gorge, a noi non note;
- imprecisioni nella descrizione fornitaci del funzionamento degli sfioratori del serbatoio di Kafue Gorge.

La modellizzazione delle Kafue Flats è la maggior fonte di incertezza; sarebbe utile approfondire questo componente per migliorare la rappresentazione della realtà, ad esempio rinunciando alla sua rappresentazione con un'unica variabile di stato. Questo naturalmente comporterebbe un aumento della complessità del modello e, quindi, una possibile inaccettabilità dei tempi di computazione. Per poter risolvere questo problema, si potrebbe utilizzare una generazione delle tuple pseudo-casuale, cioè utilizzare una procedura di generazione delle tuple che non si basi sulla combinazione esaustiva delle griglie di stato e di controllo ma scelga la combinazione di stati e controlli in modo pseudo-casuale. In questo modo sarebbe possibile aumentare le variabili di stato e/o progettare la politica di controllo a passo giornaliero.

Appendice A

La procedura PIP

Nella pianificazione delle risorse idriche il coinvolgimento degli attori sociali è essenziale per il processo decisionale. Il processo partecipativo non deve limitarsi solamente a sfruttare le informazioni raccolte tra i Portatori d'interesse (*partecipazione consultiva*), ma coinvolgerli attivamente lungo tutto il processo, fino a negoziare per l'alternativa di miglior compromesso (*partecipazione attiva*).

La procedura decisionale utilizzata nel sistema del Kafue è la PIP (Procedura di pianificazione Integrata e Partecipata) elaborata dal gruppo di ricerca del prof. Soncini Sessa [51]. La procedura proposta è rappresentata graficamente con il diagramma di flusso di Fig. A.1. Essa si propone di integrare tutti i molteplici aspetti (quantitativi e qualitativi) e gli approcci alle problematiche, caratteristiche peculiari della complessità dei sistemi ambientali. Accanto a fasi che hanno un carattere puramente ingegneristico e modellistico ve ne sono altre di natura più sociologica. Nel caso dello sfruttamento delle risorse idriche, così come in ogni progetto che preveda l'interazione con l'ambiente, si ha a che fare con un sistema molto articolato e complesso: una decisione corretta può essere assunta solo quando siano descritti tanto gli aspetti fisico-tecnici del sistema su cui si interviene, quanto le aspettative, i desideri, i problemi e i timori che caratterizzano i Portatori d'interesse. Le fasi non risultano puramente sequenziali tra loro, ma possono presentare recursioni dovute al fatto che durante lo svolgimento del processo decisionale si ottengono nuove informazioni, alla luce delle quali può essere utile riesaminare fasi che si ritenevano già concluse e, se necessario, modificarle. Di seguito viene riportata una sintetica descrizione delle fasi della PIP.

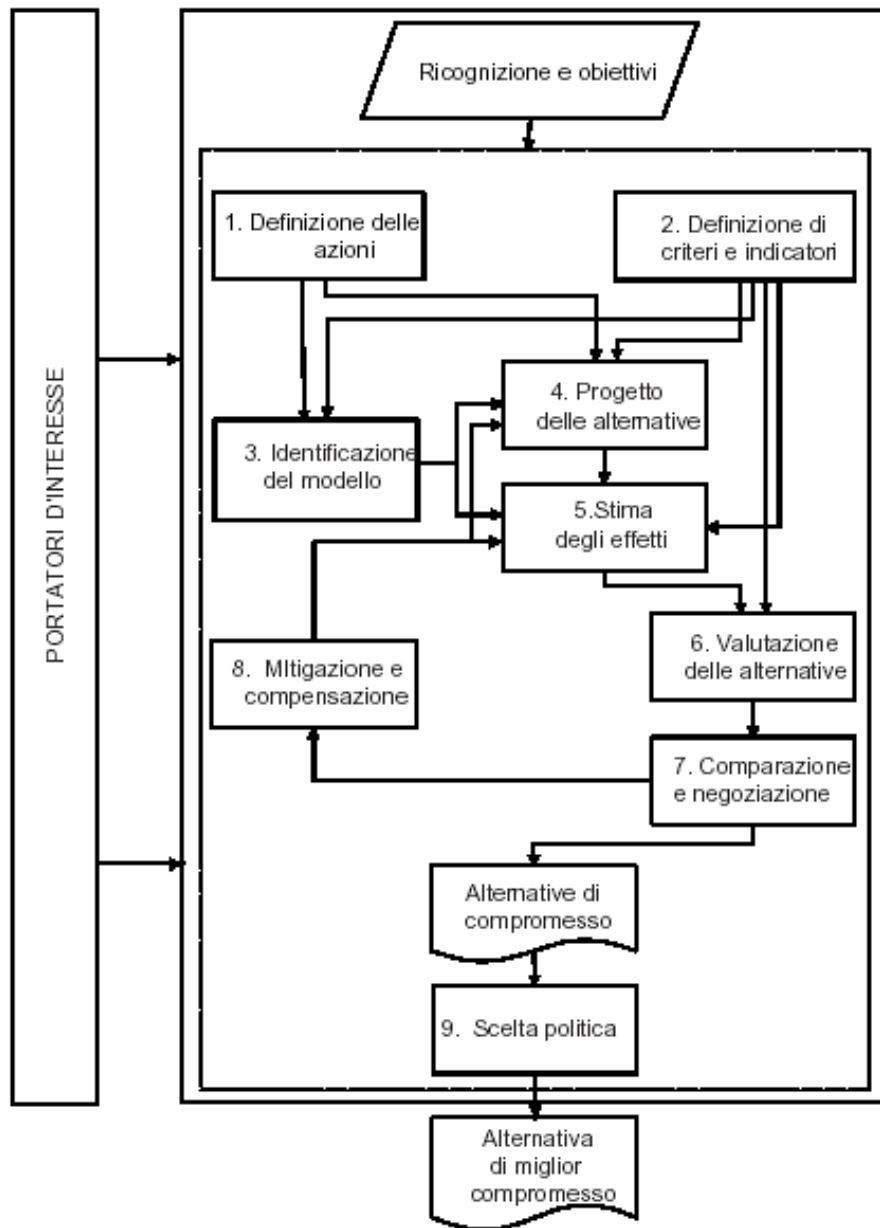


Figura A.1: Le fasi della procedura PIP.

Fase 0. Ricognizione e obiettivi Si individuano l'obiettivo del Progetto, i confini (spaziali e temporali) del sistema e l'insieme dei Portatori d'interesse coinvolti. Occorre definire una descrizione del territorio in esame (scenario di base) e individuare le informazioni disponibili e quelle mancanti. Occorre poi raccogliere le diverse esigenze, i timori e le aspettative dei Portatori in relazione con la risorsa. Si analizza quindi il contesto normativo e pianificatorio-programmatico in cui il Progetto si colloca. È essenziale che la PIP venga illustrata e approvata da tutti gli attori (Portatori d'interesse e Decisori) e che essi condividano le informazioni disponibili e concordino sulla loro validità. È possibile quindi definire gli obiettivi del progetto, derivandoli da quelli strategici degli attori e/o dal contesto pianificatorio-normativo, attraverso la costruzione di una *vision* condivisa.

Fase 1. Definizione delle azioni Tenendo conto degli obiettivi dei diversi Portatori d'interesse si individuano le possibili azioni di intervento, esplicitate nel corso di incontri collegiali o attraverso colloqui con l'Analista. Questa fase ha come scopo quello di creare una lista di tutti i più disparati tipi di intervento immaginati dai Portatori. Ciascun intervento viene infine scomposto in azioni che, ricombinate in tutti i possibili modi, genereranno le alternative (Fase 4). Di queste azioni, si considerano solo quelle ammissibili, ovvero realmente implementabili date le caratteristiche e i vincoli del sistema e i limiti del progetto.

Fase 2. Definizione dei criteri e degli indicatori Per valutare gli effetti delle alternative sul sistema è necessario individuare, interagendo con i Portatori d'interesse, un insieme di criteri di valutazione, che riflettano le caratteristiche del problema e la modalità con cui i Portatori esprimono i loro giudizi. I Portatori che condividono gli stessi criteri e la medesima gerarchia di valutazione costituiscono un *settore*. I criteri si strutturano in una gerarchia partendo dai concetti più generali e dettagliandoli man mano in un albero: in altre parole, dal criterio di settore si arriva fino alla definizione dei criteri-foglia. Questi, a loro volta, vengono tradotti in indicatori di valutazione con cui misurare l'effetto di una data alternativa rispetto a quel criterio. In questa fase entrano in gioco Esperti di settore che possono affiancare i Portatori e l'Analista nella definizione degli indicatori.

Fase 3. Identificazione del modello del sistema Per quantificare gli effetti che le diverse alternative produrrebbero sugli indicatori occorre disporre di un modello che descriva le relazioni causa-effetto presenti nel sistema. Queste relazioni possono

essere formalizzate in termini matematici, oppure sfruttando basi di conoscenza e regole empiriche con cui interrogarle. Il sistema su cui si intende intervenire è rappresentabile attraverso grandezze che variano nel tempo. È possibile così effettuare delle simulazioni per capire qual è la risposta del sistema alla scelta di un'alternativa nel tempo.

Fase 4. Progetto delle alternative Le alternative si costruiscono combinando tra loro, in modo appropriato, le azioni identificate nella Fase 1. Questo processo si basa su una formalizzazione matematica, con la quale si definisce un problema di controllo ottimo, detto *problema di progetto* risolvendo il quale si ottengono le alternative efficienti rispetto a obiettivi di progetto. Tra queste si selezionano le alternative più interessanti, sulla base dei criteri identificati dai Portatori nella Fase 2. Nella costruzione delle alternative, bisogna tener presente la possibilità di non fare nulla: questa opzione è identificata come *Alternativa Zero*.

Fase 5. Stima degli effetti Identificate le alternative occorre stimarne gli effetti, cioè stimare i valori che gli indicatori di valutazione assumono in corrispondenza di ognuna di esse. Per comparare i diversi effetti si adotta come riferimento lo scenario storico così che si possa confrontare l'effetto di ciò che è realmente accaduto in passato con l'effetto di ciò che sarebbe accaduto se si fosse scelta quella particolare alternativa. Alla fine di questa fase i valori degli indicatori ottenuti vengono organizzati in una tabella, detta matrice degli effetti, le cui colonne corrispondono alle alternative e le righe al valore assunto dagli indicatori.

Fase 6. Valutazione delle alternative Ogni indicatore misura l'effetto prodotto da un'alternativa in unità di misura fisiche su un particolare criterio. Tuttavia la soddisfazione che il Portatore ricava da una data alternativa non è sempre direttamente proporzionale al valore assunto dall'indicatore. È necessario associare ad ogni valore che l'indicatore può assumere il valore di un indice adimensionale, che esprima la soddisfazione che essi associano a quel valore dell'indicatore. Tramite interviste con i Portatori del settore si identifica una funzione valore che permetta di assegnare un valore all'indice di settore, partendo dai valori assunti da ogni indicatore. In questo modo per ogni Portatore viene costruita la matrice dei valori o matrice di valutazione: essa consiste in una tabella che riporta i valori assunti dagli indici di settore in corrispondenza di ciascuna alternativa. In questo modo

ogni Portatore è in grado di valutare le alternative sulla base del proprio grado di soddisfazione.

Fase 7. Comparazione delle alternative e negoziazione Lo scopo di questa fase è l'individuazione di un'alternativa che sia giudicata un compromesso accettabile da tutti i Portatori di interesse e che non incontri quindi l'opposizione di alcuno. Un alternativa che migliori i valori di tutti i Portatori rispetto all'Alternativa Zero è la soluzione ideale, ma non sempre esiste. Occorrerà che i Portatori d'interesse individuino quelle alternative che riscuotono maggior consenso e l'elencazione di chi è favorevole o contrario ad ognuna di esse. Ogni Portatore dovrà inoltre diventare consapevole dei punti di vista altrui e di quali siano gli effetti negativi che le alternative a lui più gradite producono per gli altri. La ricerca del miglior compromesso viene effettuata tramite una negoziazione tra i Portatori. Qualora il consenso sulla scelta di una alternativa non si riesca a raggiungere, è necessario ripercorrere la procedura introducendo misure di mitigazione e/o compensazione (Fase 8).

Fase 8. Mitigazione e compensazione In questa fase si studiano misure di mitigazione o compensazione per poter allargare ulteriormente il consenso, andando incontro alle esigenze di alcuni Portatori insoddisfatti, per quelle alternative che godono del consenso della maggioranza dei Portatori. Per questo occorre individuare nuove opzioni di intervento da includere nell'alternativa, che agiscano in modo specifico sui settori insoddisfatti. Si instaura così una ricorsione tra le Fasi 4, 5, 6, 7 e 8 che termina quando non è più possibile trovare azioni di mitigazione. Le alternative di attrazione ottenute a quel punto sono dette alternative di compromesso e ciascuna di esse è sostenuta da un gruppo di Portatori d'interesse.

Fase 9. Scelta politica Ai Decisori spetta individuare, tra le alternative di compromesso, quella di miglior compromesso, quella cioè che meglio contempera i diversi interessi, o quella su cui essi riescono ad accordarsi.

Bibliografia

- [1] M.C. Acreman, F.A.K. Fraquharson, M.P. McCartney, C. Sullival, K. Campbell, N. Hodgson, J. Morton, D. Smith, M Birley, D. Knott, J. Lazenby, R. Wingfield, and E.B. Barbier. Managed flood releases from reservoirs: issues and guidance. Report to DFID and the World Commission on Dams. Technical report, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK, 2000.
- [2] R. Bellman. Dynamic Programming. Technical report, Princeton University Press,, Princeton University Press,, 1957.
- [3] R. Bellman, R. Kabala, and B. Kotkin. Polynomial approximation - a new computational technique in dynamic programming. *Mathematics of Computation*, 17:155–161, 1963.
- [4] D. Bertsekas and J. Tsitsiklis. *Neuro-Dynamic Programming*. Athena Scientific, Boston, 1996.
- [5] L. Breiman, J. Friedman, R. Olsen, and C. Stone. *Classification and regression trees*. Wadsworth Brooks, Pacific Grove, 1984.
- [6] J.J. Burke. Approaches to integrated water resource development and management. *Natural Resources Forum*, 18:181–192, 1994.
- [7] A. Castelletti, G. Corani, A. Rizzoli, R. Soncini-Sessa, and E. Weber. A reinforcement learning approach for the operational management of a water system. In *Proceedings of 16th IFAC World Congress*, August 2001.
- [8] A. Castelletti, de Rigo D., R. Soncini-Sessa, A. Rizzoli, and E. Weber. An improved technique for neuro-dynamic programming applied to the efficient and integrated water resources management. In *Proceedings of 16th IFAC World Congress*, July 2005.

- [9] C. Cervellera, V. Chen, and A. Wen. Optimization of a large scale water reservoir network by stochastic dynamic programming with efficient state space discretization. *European Journal of Operational Research*, 171:1139–1151, 2006.
- [10] H.N.W. Chabwela and W. Mumba. Integrating water conservation and population strategies on the Kafue Flats. In *Water and Population Dynamics*. American Association for the Advancement of Science, 2004.
- [11] W. Chansa and G. Kampamba. The population status of the Kafue Lechwe in the Kafue Flats, Zambia. *Afr. J. Ecol*, 48:837–840, 2009.
- [12] D. Ernst. *Near optimal closed-loop control. application to electric power systems*. PhD thesis, University of Liege, 1999.
- [13] D. Ernst, P. Geurts, and L. Wehenkel. Tree-based batch mode reinforcement learning. *Journal of Machine Learning Research*, 6:503–556, 2005.
- [14] FAO. Yield Response to Water Deficit. Technical Report 33, Food and Agriculture Organization, Rome, I, 1986.
- [15] FAO. CLIMWAT: A climatic database for CROPWAT. Technical Report 49, Food and Agriculture Organization, Rome, I, 1994.
- [16] FAO. CROPWAT. A computer program for irrigation planning and management. Technical Report 46, Food and Agriculture Organization, Rome, I, 1995.
- [17] Centre for Ecology and Hydrology (CEH). Managed flood releases: A working conference on guidelines for managed flood releases and lessons learned from Itezhi-tezhi. Technical report, Report for Workshop, Lusaka, Zambia, 2001.
- [18] M. Gatto. On Volterra and D’Ancona’s footsteps: The temporal and spatial complexity of ecological interactions and networks. *Italian Journal of Zoology*, 76:3–15, 2009.
- [19] G. Gordon. *Approximate solutions to markov decision processes*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 1999.
- [20] A. Gossert and J. Haugstetter. Hydroelectric Power Production at the Kafue River. Technical report, ETH, Zurich, 2005.

- [21] T. Haller. The Contested Floodplain. In *The Institutional Change of Common Pool Resource Management and Conflict among the Ila, Tonga and Batwa, Kafue Flats (Southern Province) Zambia*, 2007.
- [22] T. Haller and S. Merten. "We are Zambians - Don't Tell Us How to Fish!" Institutional Change, Power Relations and Conflicts in the Kafue Flats Fisheries in Zambia. *Hum Ecol*, 36:699–715, 2008.
- [23] HARZA. Feasibility study of the Itezhi Tezhi Hydroelectric project. Technical report, ZESCO, 1999.
- [24] M. Hejazi, X. Cai, and B. Ruddell. The role of hydrologic information in reservoir operation - learning from historical releases. *Advances in Water Resources*, 31:1636–1650, 2008.
- [25] Chabwela H.N. and G.A. Ellenbroek. The impact of hydro-electric developments on the Kafue Lechwe and its feeding grounds at Kafue Flats, Zambia. In Whingham DF, editor, *Wetland Ecology and Management Case Studies*, pages 95–105. 1990.
- [26] G.W. Howard and G.J. Williams. Proceedings of the National Seminar on Environment and Change: The Consequences of Hydroelectric Power Development on the Utilization of the Kafue Flats. Technical report, Kafue Basin Research Committee of the University of Zambia, Lusaka, Zambia, 1982.
- [27] S. Johnson, J. Stedinger, C. Shoemaker, Y. Li, and J. Tejada-Guibert. Numerical solution of continuous-state dynamic programs using linear and spline interpolation. *Operations Research*, 41:484–500, 1993.
- [28] S. Kalyanakrishnan and P. Stone. Batch reinforcement learning in a complex domain. In *The Sixth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, May 2007.
- [29] R.L. Keeney and H. Raiffa. *Decision with multiple objectives: Preferences and Value Trade-offs*. John Wiley and Sons, New York, NY, 1976.
- [30] L. Magri. *Problematrice delle turbomacchine*. Pitagora Editrice Bologna, Bologna, 1987.

- [31] M.P. McCartney and H.A. Houghton-Carr. A Modelling Approach to Assess Inter-Sectoral Competition for Water Resources in the Kafue Flats, Zambia. *J.CIWEM*, 12:101–106, 1998.
- [32] M.A.E. Mortimer. *Natural resource handbook. the fish and the fisheries of Zambia. Game and fish department.* Falcon, Ndola (Zambia), 1965.
- [33] M Mumba and J.R. Thompson. Hydrological and ecological impacts of dams on the Kafue Flats floodplain system, southern Zambia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30:442–447, 2005.
- [34] C. Munyati. Wetland change detection on the Kafue Flats, Zambia, by classification of a multitemporal remote sensing image dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 21-9:1787–1806, 2000.
- [35] P. Obrdlik, A. Mumeka, and J.M. Kasonde. Regulated rivers in Zambia - the case study of the Kafue River. *Regulated Rivers: Research and Management*, 3:371–380, 1989.
- [36] D. Ormoneit and S. Sen. Kernel-based reinforcement learning. *Machine Learning*, 49:161–178, 2002.
- [37] C.R.S Pitman. *A report on afaunal survey of Northern Rhodesia with special reference to Game, Elephant Control and National Parks.* Government Printer, Livingstone, Northern Rhodesia, 1934.
- [38] N.L. Poff, J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestergaard, Richter B.D., R.E. Sparks, and Stromberg J.C. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience*, 47:769–784, 1997.
- [39] W.A. Rees. Do the dams spell disaster for the Kafue lechwe? *Oryx*, 14:231–236, 1978.
- [40] W.A. Rees. The ecology of the Kafue lechwe. *J. Appl. Ecol.*, 15:167–217, 1978.
- [41] W.A. Rees. The ecology of the Kafue Lechwe as affected by the Kafue Gorge Hydro-Electric Scheme. *J.Appl. Ecol.*, 15:205–217, 1978.
- [42] S. Rinaldi. A method for the real time forecast of the outflow from a lake. *Applied Mathematical Modelling*, 4:322–324, 1980.

- [43] B. Roslett. Aquatic weed problems in a hydroelectric river: the river Otra, Norway. *Rigulated Rivers: Res. Manag.*, 17:303–310, 1988.
- [44] SADC. Itezhi/Kafue Gorge Operating Procedure, Draft Final Report, South African Development Community. Technical report, Shawinigan Engineering, 1993.
- [45] A. Sayer and L.P. Van Laviere. The ecology of the Kafue lechwe population of Zambia before the operation of the hydroelectric dams on the Kafue River. *East Afr. Wildlife J.*, 13:9–37, 1975.
- [46] R.B. Schuster. Reproductive social organisation of the Kafue lechwe. In *Proceedings of the Fourth Regional Wildlife Conference for Eastern and Central Africa*, 1976.
- [47] R.H. Schuster. The social organisation of the Kafue Lechwe. In Ed. G.W. Howard, editor, *Development and Ecology in the Lower Kafue Basin in the Nineteen Seventies*. 1977.
- [48] R.H. Schuster. Will the Kafue lechwe survive the Kafue dam? *Oryx*, 15:476–489, 1980.
- [49] H. Sinyangwe and D. Stephenson. Application of the RAFLS model for integrated water resource management for the Itezhi-Tezhi Kafue river system. *Water SA*, 31:457–463, 2005.
- [50] R. Soncini Sessa. *Modellistica integrata e decisione partecipata in pratica. Il Progetto Verbano*. McGraw-Hill, Milano, I, 2004.
- [51] R. Soncini Sessa. *Pianificazione e gestione delle risorse idriche: MODSS per decisioni integrate e partecipate*. McGraw-Hill, Milano, I, 2004.
- [52] J. Tejada-Guibert, S. Johnson, and J. Stedinger. The value of hydrologic information in stochastic dynamic programming models of a multireservoir system. *Water Resources Research*, 31:2571–2579, 1995.
- [53] A. Turgeon. A decomposition method for the long-term scheduling of reservoirs in series. *Water Resources Research*, 17:1565–1570, 1981.

- [54] G.J. Williams. Development and ecology in the Lower Kafue Basin in the nineteen seventies. Technical report, Kafue Basin Research Committee of the University of Zambia, Lusaka, Zambia, 1977.
- [55] WWF. Integrated Water Resources Management Project for the Kafue Flats - Phase 2. Decision Making System for Improved Water Resource Management for the Kafue Flats. Technical report, Republic of Zambia. Ministry of Energy and Water Development, 2004.
- [56] WWF ZESCO. Kafriba Model Description. Technical report, DHV, 2006.