

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

Corso di laurea in **INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

Tesi di laurea in **GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE M**

***Dimensionamento di serbatoi per la raccolta di acque
piovane destinate all'utilizzo irriguo in un orfanotrofio
ad Allada (Benin)***

CANDIDATO

RELATORE

Ezio Casciaro

Chiar.ma Dott.ssa Serena Ceola

Anno Accademico 2018/2019

Sessione III

SOMMARIO

INTRODUZIONE	12
CAPITOLO 1 – Inquadramento generale dell’area.....	17
1.1 Caratterizzazione geologica, idrogeologica e pedologica	19
1.2 Caratterizzazione meteorologica.....	24
1.3 Caratterizzazione idrografica.....	28
1.4 Gestione e utilizzo dell’acqua.....	34
CAPITOLO 2 – Dati di pioggia	39
2.1 Database: fonti e caratteristiche.....	39
2.2 Intensità di pioggia	46
2.3 Dati di pioggia mensili per la stazione pluviometrica di Allada	50
CAPITOLO 3 – Destinazione della risorsa	69
3.1 Uso irriguo.....	69
3.2 Evapotraspirazione e coefficiente culturale.....	73
3.3 Calcolo dell’evapotraspirazione mensile ETc per diversi tipi di coltura	86
3.3.1 Arachide (<i>Arachis hypogaea</i>)	92
3.3.2 Fagiolo di soia (<i>Glycine max</i>)	94
3.3.3 Fagiolo ‘occhio nero’ (<i>Vigna unguiculata</i>)	96
3.3.4 Mais (<i>Zea mays</i>)	98
3.3.5 Manioca (<i>Manihot esculenta</i>)	101
3.3.6 Patata dolce (<i>Ipomoea batatas</i>)	103

3.3.7 Pomodoro (<i>Lycopersicon esculentum</i>).....	105
3.3.8 Riso (<i>Oryza sativa</i>)	107
3.3.9 Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> o <i>sorghum vulgare</i>).....	109
CAPITOLO 4 – Dimensionamento di serbatoi di raccolta di acqua piovana per scopi irrigui...	111
4.1 Metodologia.....	111
4.2 Risultati.....	116
4.2.1 Scenario 1, colture poco idro-esigenti – Piantagione	117
4.2.2 Scenario 1, colture poco idro-esigenti – Orto.....	121
4.2.3 Scenario 2, colture molto idro-esigenti – Piantagione.....	124
4.2.4 Scenario 2, colture molto idro-esigenti – Orto	128
4.2.5 Scenario 3, monocoltura – Piantagione	131
4.2.6 Scenario 3, monocoltura – Orto.....	134
CONCLUSIONI.....	137
Appendice.....	141
Esempio di script per la piantagione	141
Esempio di script per l’orto	143
Bibliografia.....	147
Sitografia	148

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Evoluzione dei conflitti per l'acqua negli ultimi decenni (worldwater.org)	13
Figura 2 Mappa interattiva dei conflitti per l'acqua dal 2010 ad oggi (worldwater.org)	13
Figura 3 Territorio del Benin evidenziato in bianco (Google Earth, 2015)	18
Figura 4 Carta descrittiva del territorio beninese (Le Barbé et al., 1993)	19
Figura 5 Carta geologica del Benin (rapporto UNICEF)	20
Figura 6 Cronologia ere geologiche (Holmes, 1959)	21
Figura 7 Distribuzione dei suoli (H. A. Azontonde, 1991)	23
Figura 8 Distribuzione spazio-temporale della radiazione solare in ingresso nell'atmosfera: le curve rappresentano l'energia solare ricevuta dalla superficie terrestre a livello del mare [cal(cm ² /g)]. Nel calcolo si è considerato un coefficiente di trasmissione pari a 0.7 (Disegno di J.P. Debuiche - Le Barbé et al., 1993)	25
Figura 9 Schema dei venti (Wikipedia).....	26
Figura 10 Mappa idrografica del Benin (Azonsi et al., 2008).....	28
Figura 11 Divisione del Benin in sottobacini (Azonsi et al., 2008)	29
Figura 12 Bacino del Niger nel nord-est del paese (Wikipedia)	31
Figura 13 Confine ovest del paese (Wikipedia)	33
Figura 14 Carta fisica del sud del paese (Wikipedia).....	34
Figura 15 AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005	35
Figura 16 Celle di dimensione 5° per 5° (CRU TS4.03, 2009).....	41
Figura 17 Celle di dimensione 0.5° per 0.5° (CRU TS4.03, 2009).....	41

Figura 18 Numero di dati mensili per le variabili primarie temperatura (TMP), precipitazioni totali (PRE) e intervallo di temperatura diurno (DTR). L'area nera rappresenta il numero di dati effettivamente utilizzati, la linea continua indica il totale dei dati a disposizione. (Harris et al., 2014).....	42
Figura 19 Schema di un pluviometro classico (albertomontanari.it, 2018)	47
Figura 20 Schema di un pluviometro/pluviografo a pennino	48
Figura 21 Esempio di pluviografo a bascula (Stefano Cirilli - Università degli Studi di Trieste, 2015).....	49
Figura 22 Istogrammi relativi all'andamento delle precipitazioni mensili negli anni che vanno dal 1922 al 1949	53
Figura 23 Istogrammi relativi all'andamento delle precipitazioni mensili negli anni che vanno dal 1950 al 1975	54
Figura 24 Istogrammi relativi all'andamento delle precipitazioni mensili negli anni che vanno dal 1976 al 1989	55
Figura 25 Istogramma delle precipitazioni mensili dell'anno medio	56
Figura 26 Schemi delle precipitazioni medie mensili nel periodo 1925-1984 divisi per zone (Le Barbé et al., 1993).....	57
Figura 27 Grafico in tre dimensioni: mese, latitudine e percentuale di precipitazione sul totale (Le Barbé et al., 1993).....	58
Figura 28 Grafico a linee in cui si evidenziano le differenze tra gli andamenti di anno medio, anno tipico (1950) e anno peggiore (1968)	59
Figura 29 Distribuzione del mese più secco dell'anno negli anni 1922-1989	61
Figura 30 Distribuzione del mese più piovoso dell'anno negli anni 1922-1989.....	61
Figura 31 Distribuzione dei valori di precipitazione [mm/mese] massimi e minimi annuali mediante grafico a dispersione	63

Figura 32 Distribuzione dei valori di precipitazione dei soli massimi mensili per ciascun anno mediante grafico a dispersione. La linea rossa identifica la retta di regressione lineare dei dati di massimo osservati, la linea nera tratteggiata indica il valore medio dei massimi rappresentati dai punti neri.....	64
Figura 33 Distribuzione dei valori di precipitazione dei soli minimi mensili per ciascun anno mediante grafico a dispersione. La linea rossa identifica la retta di regressione lineare dei dati di minimo osservati, la linea nera tratteggiata indica il valore medio dei minimi rappresentati dai punti neri.....	65
Figura 34 Andamento della variazione massima annuale mediante grafico a linee. La linea rossa identifica la retta di regressione lineare dei dati di variazione annua elaborati, la linea nera tratteggiata indica il valore medio di tale variazione.....	66
Figura 35 Andamento della precipitazione annua totale mediante grafico a linee. La linea rossa identifica la retta di regressione lineare dei dati di precipitazione annua osservati, la linea nera tratteggiata indica il valore medio di precipitazione annua.....	67
Figura 36 Percentuale di aree ben servite su campi piccoli, medi e grandi (AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005).....	71
Figura 37 Percentuali di utilizzo dei diversi tipi di irrigazione (AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005).....	72
Figura 38 Metodi di stima e misura dell'evapotraspirazione (Perniola)	74
Figura 39 Andamento di evaporazione e traspirazione dalla semina al raccolto (Allen et al., 1998).....	75
Figura 40 Valori tipici di K_c per diverse colture (Allen et al., 1998)	80
Figura 41 Andamento del coefficiente colturale nei diversi stadi (Allen et al., 1998).....	82
Figura 42 Metodo grafico per ricavare il valore di $K_{c,ini}$ nel caso di infiltrazione modesta (Allen et al., 1998).....	83
Figura 43 Metodo grafico per ricavare il valore di $K_{c,ini}$ nel caso di infiltrazione profonda in suoli a pezzatura grossolana (Allen et al., 1998).....	83

Figura 44 Metodo grafico per ricavare il valore di $K_{c,ini}$ nel caso di infiltrazione profonda in suoli a pezzatura media e fine (Allen et al., 1998)	84
Figura 45 Grafici che restituiscono la modifica da apportare al valore di $K_{c,mid}$ per clima sub-umido (Allen et al., 1998).....	85
Figura 46 Finestra del database AQUASTAT, dati di evapotraspirazione (FAO).....	87
Figura 47 Finestra del database AQUASTAT, dati di umidità e velocità del vento (FAO) ...	87
Figura 48 Vista del tool FAO chiamato 'Crop calendar' (www.fao.org/agriculture/seed/cropcalendar/searchbycountry.do)	89
Figura 49 Diagramma esplicativo degli step seguiti per ottenere il bilancio tra precipitazioni e richiesta idrica delle diverse colture	91
Figura 50 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale K_c per l'arachide.....	92
Figura 51 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ET_c per l'arachide	92
Figura 52 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ET_c per l'arachide. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.....	93
Figura 53 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale K_c per il fagiolo di soia.....	94
Figura 54 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ET_c per il fagiolo di soia	94
Figura 55 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ET_c per il fagiolo di soia. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.....	95
Figura 56 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale K_c per il fagiolo 'occhio nero'	96

Figura 57 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il fagiolo ‘occhio nero’	96
Figura 58 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all’anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il fagiolo ‘occhio nero’. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.	97
Figura 59 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per il mais per il primo periodo	98
Figura 60 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per il mais per il secondo periodo	98
Figura 61 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il mais per il periodo 1	99
Figura 62 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il mais per il periodo 2	99
Figura 63 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il mais (valore totale)	100
Figura 64 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all’anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il mais. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.	100
Figura 65 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per la manioca	101
Figura 66 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per la manioca ...	101
Figura 67 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all’anno medio) ed evapotraspirazione ETc per la manioca. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.	102
Figura 68 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per la patata dolce	103

Figura 69 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per la patata dolce	103
Figura 70 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per la patata dolce. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.....	104
Figura 71 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per il pomodoro	105
Figura 72 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il pomodoro.	105
Figura 73 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il pomodoro. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.....	106
Figura 74 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per il riso.....	107
Figura 75 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il riso	107
Figura 76 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il riso. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.	108
Figura 77 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per il sorgo.....	109
Figura 78 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il sorgo	109
Figura 79 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il sorgo. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.....	110
Figura 80 Istogramma ordinato della richiesta idrica delle nove colture considerate	114

Figura 81 Grafico a torta che descrive la distribuzione percentuale delle combinazioni in base al relativo valore d'area del serbatoio per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, piantagione	118
Figura 82 Grafico a torta che descrive la distribuzione percentuale delle combinazioni in base al relativo range di valori d'area del serbatoio per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, orto	121
Figura 83 Grafico a torta che descrive la distribuzione percentuale delle combinazioni in base al relativo valore d'area del serbatoio per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, piantagione	125
Figura 84 Grafico a torta che descrive la distribuzione percentuale delle combinazioni in base al relativo range di valori d'area del serbatoio per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, orto.....	128

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005	35
Tabella 2 Confronto tra il database CRU utilizzato per l'analisi ed un secondo database fornito da KNMI Climate Explorer	51
Tabella 3 Dati di precipitazione mensili espressi in mm/mese	52
Tabella 4 Precipitazioni mensili dell'anno medio.....	56
Tabella 5 Medie, valori estremi e deviazioni standard su scala mensile dei valori di precipitazione relative agli anni 1922-1989	60
Tabella 6 Valori di errore standard su scala mensile dei valori di precipitazione relative agli anni 1922-1989.....	60
Tabella 7 Panoramica dell'irrigazione del Benin (AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005)	70
Tabella 8 Valori espressi in ettari delle superfici in cui l'apporto idrico è controllato e fornito da infrastrutture (AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005).....	71
Tabella 9 Sviluppo dell'infrastruttura irrigua tra il 1993 e il 2001 (AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005).....	72
Tabella 10 Sintesi degli intervalli considerati e del numero di combinazioni ottenute nel caso della piantagione.....	116
Tabella 11 Sintesi degli intervalli considerati e del numero di combinazioni ottenute nel caso dell'orto	116
Tabella 12 Set di combinazioni prese ad esempio per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, piantagione	117
Tabella 13 Volumi mensili nel serbatoio e dimensionamento dello stesso per ogni combinazione in analisi per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, piantagione.....	119

Tabella 14 Set di combinazioni prese ad esempio per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, orto.....	121
Tabella 15 Volumi mensili nel serbatoio e dimensionamento dello stesso per ogni combinazione in analisi per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, orto	122
Tabella 16 Set di combinazioni prese ad esempio per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, piantagione	124
Tabella 17 Volumi mensili nel serbatoio e dimensionamento dello stesso per ogni combinazione in analisi per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, piantagione	126
Tabella 18 Set di combinazioni prese ad esempio per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, orto.....	128
Tabella 19 Volumi mensili nel serbatoio e dimensionamento dello stesso per ogni combinazione in analisi per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, orto.....	129
Tabella 20 Distribuzione della superficie totale della piantagione per coltura	131
Tabella 21 Volumi e dimensionamenti risultanti dalla divisione della superficie totale della piantagione	132
Tabella 22 Distribuzione della superficie totale dell’orto per coltura	134
Tabella 23 Volumi e dimensionamenti risultanti dalla divisione della superficie totale dell’orto	135

INTRODUZIONE

La presente tesi nasce da un'esigenza segnalata dall'associazione culturale *Verso*, un gruppo di giovani architetti impegnati in iniziative di cooperazione internazionale. Uno dei loro progetti, in collaborazione con l'organizzazione non governativa beninese *La Maison de la Joie*, riguarda la costruzione di un orfanotrofio, con un grande campo per le diverse colture, nella città di Allada, nel sud del Benin. Per maggiori dettagli sull'associazione culturale *Verso* o sul progetto in questione, si rimanda al sito web: www.collettivoverso.com. Attualmente, il progetto è ancora in una fase preliminare atta all'organizzazione degli spazi e della struttura.

La presente tesi offre un'attività di supporto alla progettazione dell'orfanotrofio, con particolare riferimento al dimensionamento di serbatoi di raccolta di acqua piovana per fini irrigui e civili. Il problema generale che si va a trattare riguarda l'utilizzo della risorsa idrica in contesti particolari dal punto di vista climatico che spesso coincidono con paesi in via di sviluppo. Lo status di paese in via di sviluppo e le criticità dettate dall'avanzare dei cambiamenti nel panorama meteo-climatico mondiale sono strettamente correlate perché, specie per le popolazioni dedite all'agricoltura, non esiste sviluppo che non passi dalla garanzia di avere un buon quantitativo di acqua disponibile ed utilizzabile. Tutto questo si inserisce in un discorso di più ampio respiro riguardante i cambiamenti climatici. Essi, estremizzando gli eventi, da una parte portano ad un sostanziale aumento delle calamità naturali sia dal punto di vista della frequenza che dell'intensità mentre dall'altra sono responsabili delle richieste idriche sempre crescenti conseguenti alla nuova situazione. Ciò porta a vedere la gestione dell'acqua, il bene primario per definizione, come un tema di particolare interesse scientifico per le sicure ripercussioni in ambito geopolitico e sociale. Se la maggiore richiesta non è associata ad una maggiore disponibilità (che può essere raggiunta studiando a fondo il tema della gestione della risorsa e sviluppando nuove tecniche) allora potrebbero manifestarsi tensioni e conflitti (**Figura 1**). A questo proposito il sito www.worldwater.org è una fonte ricca di riferimenti utili a focalizzare il problema.

Cronologia dei conflitti d'acqua (1950-2015)

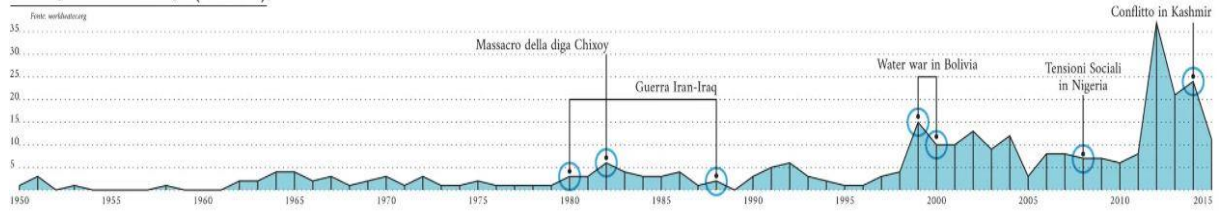


Figura 1 Evoluzione dei conflitti per l'acqua negli ultimi decenni (worldwater.org)

All'interno del sito è presente una mappa interattiva (**Figura 2**) con la quale localizzare nello spazio e nel tempo i vari conflitti dovuti al controllo dell'acqua e semplicemente interrogandola per qualche minuto si prende coscienza del fatto che si parla di un fenomeno globale e in crescita.

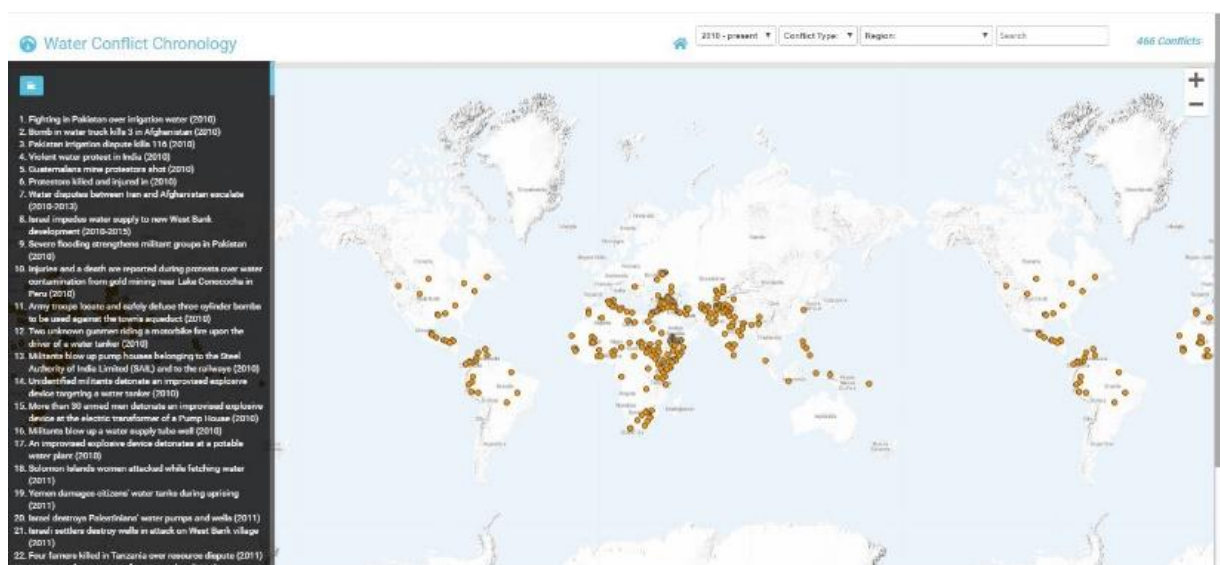


Figura 2 Mappa interattiva dei conflitti per l'acqua dal 2010 ad oggi (worldwater.org)

Chiarito il problema centrale e sottolineato il valore dell'acqua in una città di medie dimensioni di un paese in via di sviluppo, si presenta la struttura dell'elaborato.

Il primo capitolo è deputato alla conoscenza del territorio su larga scala, considerando quindi l'intero stato del Benin e non solo la città di Allada, sotto diversi punti di vista, in modo tale da poter inquadrare bene l'area, capirne le caratteristiche e sapere come interagire con l'ambiente circostante. Tale descrizione parte dall'analisi della geologia locale e del tipo di suoli. Questi aspetti risultano fondamentali per evidenziare le peculiarità dell'area al fine di comprendere al meglio quale conformazione si presta ad ospitare eventuali volumi di risorsa idrica in profondità. A questo tipo di analisi segue una caratterizzazione meteorologica con la quale ci

si addentra nel campo che maggiormente influenza l'elaborato. Per ipotizzare un determinato andamento delle piogge è necessario infatti focalizzarsi sul clima locale. In particolare, nella zona presa in analisi, il clima si presenta piuttosto variegato anche a causa della forma del territorio che, come facilmente osservabile, si sviluppa lungo la latitudine subendo quindi molteplici influenze che portano a suddividere l'area del Benin in tre differenti regioni climatiche che si distinguono anche per il numero delle stagioni. Al fine di privilegiare una visione d'insieme del ciclo dell'acqua, il successivo approfondimento è incentrato sull'idrografia che si sviluppa sulla superficie beninese. Contrariamente a quanto si potrebbe pensare, il numero dei corsi d'acqua presenti è consistente, seppur ognuno di essi presenti diverse caratteristiche sia per quanto riguarda la morfologia che per tutto quanto concerne i volumi in gioco e le velocità. Nonostante alcuni dei fiumi citati nel seguito, si pensi soprattutto al Niger, siano molto lunghi e di conseguenza anche molto importanti per l'intero continente africano, non si è scesi troppo nel dettaglio cercando di evidenziare solo gli aspetti rilevanti per il tema oggetto dell'elaborato.

A questa parte segue una descrizione meno tecnica, ma pur sempre necessaria a capire come è gestita la risorsa acqua e quali sono i suoi utilizzi principali nella società beninese. È giusto assegnare a tale studio un certo peso in quanto l'ottimizzazione nell'uso della risorsa e i miglioramenti che potrebbero essere apportati alla gestione dell'acqua poggiano sulla corretta interpretazione dei dati esposti. In questa sezione però bisogna tener presente un limite che risiede nell'affidabilità dei dati. Infatti, sebbene la fonte sia autorevole (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), i valori citati risalgono ad un documento del 2005 e per questo non possono essere considerati aggiornati o pienamente rappresentativi della situazione attuale. Parallelamente a quanto detto, si presentano anche quelle che sono le istituzioni che regolano la gestione delle acque (sia sotterranee che superficiali) e si accenna brevemente al nebuloso quadro normativo di riferimento.

Nel secondo capitolo ci si muove su una scala locale, facendo riferimento quindi alla municipalità di Allada. Tale capitolo si apre con la ricerca dei dati di pioggia necessari a fornire una panoramica dell'andamento delle precipitazioni. La ricerca ha coinvolto numerosi dataset disponibili online ed è stata portata avanti con l'obiettivo di trovare un opportuno quantitativo di dati con un breve passo temporale e il più possibile circostanziati all'area di interesse. Se l'esigenza in termini spaziali è stata soddisfatta pienamente in quanto i dati utilizzati sono presi dalla stazione di Allada, stessa cosa non si può dire per il passo temporale. In assenza di dati di pioggia giornalieri, si sono utilizzati dei dati mensili i quali, nonostante una discretizzazione

minore, si prestano in modo efficace alle analisi da sviluppare. Una volta individuato il dataset di interesse si è proceduto con lo studio sullo stesso, evidenziandone il funzionamento e il metodo di raccolta dei dati. Vi è poi un piccolo focus sul tipo di dato trattato in cui si descrive brevemente il significato fisico di intensità di pioggia e l'evoluzione delle modalità di misura nel tempo. La fine del capitolo è dedicata ad un'elaborazione dei suddetti dati con l'obiettivo di avere conferma di quanto già noto in letteratura per quanto concerne il clima e l'andamento delle piogge.

Il terzo capitolo si concentra principalmente sugli utilizzi assegnati ai volumi di acqua calcolati. In questo lavoro si opera con due soli utilizzi: la situazione in essere vede due aree che necessitano di acqua per uso irriguo (piantagione e piccolo orto) e una struttura (orfanotrofio) che necessita di acqua per uso domestico. Per quest'ultima tipologia di utilizzo è necessaria una precisazione: generalmente quando si parla di utilizzo a scopo domestico si comprende anche l'acqua necessaria alla fisiologica idratazione delle persone mentre in questo caso tale volume è escluso perché non si hanno garanzie sulla potabilità né si effettuano operazioni in tal senso. L'approccio usato per queste due destinazioni d'uso è molto differente: per l'acqua per uso domestico, una volta determinato il volume e il numero di utenze, non resta che procedere direttamente coi calcoli per valutare il fabbisogno idrico che, di fatto, è un valore costante nel tempo. La stessa cosa non avviene per l'acqua destinata all'irrigazione perché vi è da considerare la stagionalità. In questo caso infatti sono necessari degli studi approfonditi sui coefficienti colturali e sui fabbisogni idrici di ogni specie in ogni mese e ciò rende l'elaborazione un po' più complessa. Vi è inoltre una ovvia proporzionalità tra i fabbisogni idrici delle piante e le superfici destinate alle diverse colture e tale proporzionalità riveste un ruolo fondamentale ai fini dei bilanci volumetrici.

Nel quarto e ultimo capitolo, sfruttando le conoscenze acquisite in precedenza e basandosi sui dati e le considerazioni fatte, si procede con il dimensionamento dei serbatoi per la raccolta delle acque meteoriche. Poiché non vi sono indicazioni precise circa le colture da utilizzare e le superfici da assegnare a ogni coltura, si sono proposti tre diversi scenari. Con la parola "scenario", spesso utilizzata nel seguito, si intende la combinazione di colture scelte tra le 9 prese in considerazione per questo elaborato. Se ne sono scelti tre diversi in base alla loro utilità didattica e perché, rappresentando degli scenari "estremi", definiscono il contorno all'interno del quale si possono trovare tutte le altre possibili combinazioni. Una volta definiti quindi tali scenari si è passati alla valutazione dell'effettiva utilità del serbatoio e all'impostazione dei bilanci all'interno dello stesso. Il bilancio per la parte della piantagione è abbastanza semplice,

gli input sono dati dalle piogge e dall'acqua precedentemente raccolta nel serbatoio mentre gli output sono riconducibili all'evaporazione dal serbatoio e al deficit irriguo. Per quanto riguarda il bilancio su orto e orfanotrofia, a quanto detto sul precedente bilancio bisogna aggiungere un input che consiste nell'acqua che si riesce a recuperare dalla copertura dell'orfanotrofia ed un output che è quello dell'acqua per uso domestico. L'obiettivo è quello di avere, in ogni momento, acqua sufficiente per sopperire alle richieste (che siano esse irrigue o civili) e questo sta a significare che il bilancio deve essere sempre positivo evitando così la crisi del serbatoio. A questo poi si deve aggiungere un ulteriore criterio che è quello di avere un serbatoio quanto più piccolo possibile. In sintesi, note le richieste d'acqua e i volumi in gioco, si definisce il dimensionamento dei serbatoi necessari, tenendo ben presente che sottodimensionare porterebbe ad un mancato sfruttamento della risorsa, quindi non si trarrebbe il massimo vantaggio possibile, mentre sovradimensionare causerebbe inutili spese e un ingombro superficiale che potrebbe essere destinato ad altro. Se in questa zona dell'Africa lo spazio non manca, sicuramente non si può dire lo stesso di acqua e risorse economiche che, quando ci sono, devono essere ottimizzate.

CAPITOLO 1 – Inquadramento generale dell'area

Il lavoro che segue si focalizza su un'area specifica dell'Africa occidentale coincidente con la città di Allada in Benin, per questo si rende necessaria una prima panoramica del luogo. Il Benin è uno stato di oltre 11 milioni di abitanti (The World Bank, 2017) in piena crescita demografica che si estende su una superficie di 112.000 km². È situato tra l'equatore e il Tropico del Cancro e confina ad ovest col Togo, a nord con Burkina Faso e Niger, ad est con la Nigeria mentre a sud è bagnato dal Golfo di Guinea appartenente alla costa Atlantica (**Figura 3**). Nonostante la superficie contenuta, il Benin presenta ecosistemi e morfologie differenti frutto di una forma allungata che si sviluppa lungo la latitudine; è uno stato piuttosto pianeggiante, i rilievi che superano i 400 metri sono meno del 5% del territorio, che presenta qualche piccola altura nel nord. Come deducibile da **Figura 4**, il territorio del Benin può essere suddiviso in cinque regioni:

- la regione costiera a sud: è una regione bassa costituita da un lungo banco di sabbia dove si trovano numerose paludi e lagune (più strette ad ovest e più larghe ad est) che in rari casi sfociano in mare; le lagune più importanti sono quelle di Porto-Novo e di Ouidah. L'altitudine dell'area difficilmente supera i 10 m slm;
- a ridosso della zona costiera si trova la zona intermedia chiamata "*Zone de Terre de barre*"; essa è una vasta area fertile costituita da due serie di altipiani separati da una depressione argillosa detta "*Dépression de la Lama*". A sud della depressione si trovano gli altipiani di Sakété, di Comé e di Allada mentre a nord gli altipiani di Aplahoué, Abomey, Kétou e Zagnanado. Nonostante si parli di altipiani, qui l'altitudine è limitata tra i 20 metri e i 200 metri;
- la zona centrale granito-gneissica che si presenta collinare ed occupa la maggior parte del territorio beninese, con altitudine media che varia da 250 metri a 300 metri. Esempi di alture in quest'area sono le colline di Dassa-Zoumè, di Bemberekè e di Sinendé;

- la regione delle montagne Atacora nel nord-ovest del paese. Tale catena, la cui altitudine varia da 400 metri a 700 metri, è costituita al suo interno da quarzite metamorfizzata e corre, abbassandosi e restringendosi, da SO a NE. A nord della regione di Natitingou, quindi nella parte ovest, la catena si sviluppa in due creste separate dalla valle del Pendjari (o Oti) mentre nell'area orientale il massiccio sovrasta la piana di Dahomeyenne. Non ci sono vette particolarmente elevate, il punto più alto è il monte Sagbarao, ma la regione riveste una grande importanza in quanto qui si trovano le sorgenti di molti fiumi che scorrono nel paese.
- le pianure sedimentarie del Niger nel nord-est, costituite da arenarie argillose, chiamate così appunto perché scendono verso la valle del fiume Niger il cui letto si trova ad un'altitudine di 160 metri. Queste pianure inoltre ricoprono le valli di diversi affluenti del Niger quali il Mékrou, l'Alibori e la Sota.

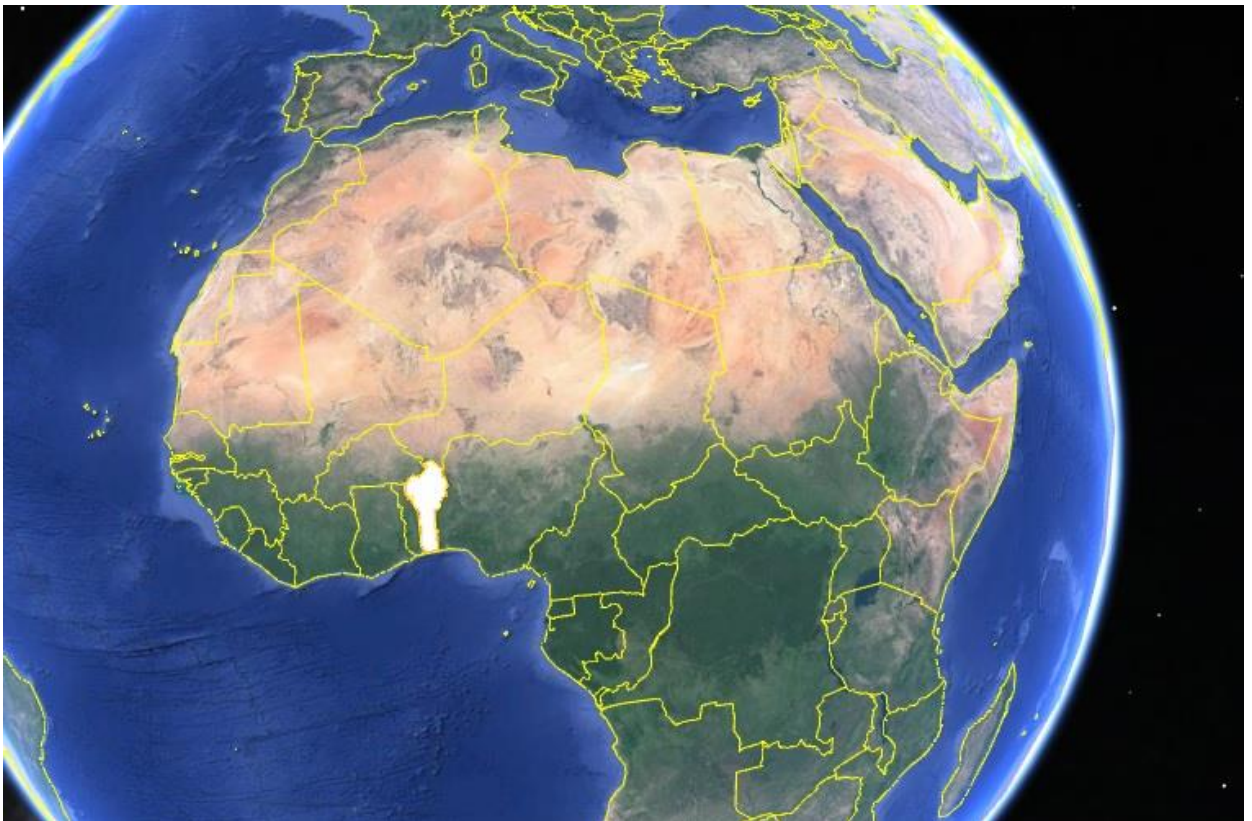


Figura 3 Territorio del Benin evidenziato in bianco (Google Earth, 2015)

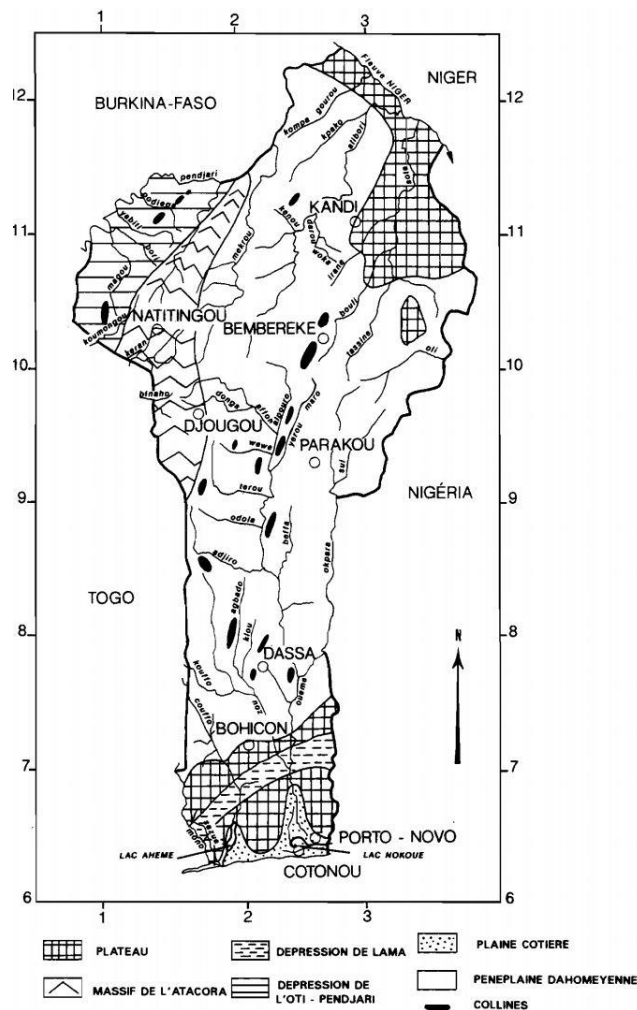


Figura 4 Carta descrittiva del territorio beninese (Le Barbé et al., 1993)

1.1 Caratterizzazione geologica, idrogeologica e pedologica

Il territorio beninese (**Figura 5**) è geologicamente suddiviso in due macroaree: la parte meridionale è una porzione, ricoperta da rocce sedimentarie, del *Continental Terminal* dell'Africa occidentale; esso è stato definito da Kilian (1931) come una grande formazione detritica continentale del Cenozoico per poi essere successivamente citato anche per indicare alcune strutture mesozoiche in cui era evidente il carattere ferralitico dei suoli. Più in generale il *Continental Terminal* è tipico di eventi geodinamici con età variabile dall'Eocene al Quaternario. La parte settentrionale, molto più estesa, è invece principalmente costituita da una base cristallina precambriana, composta da gneiss, granito, quarzite e intrusioni magmatiche, interamente ricoperta da rocce sedimentarie.

In questo contesto si individuano tre grandi bacini (Le Barbé et al., 1993): il bacino costiero a sud, il bacino di Kandi a nord-est e il bacino del Volta a nord-ovest. Il primo è costituito dai

quattro altopiani del Cretaceo (Kétou, Zagnanado, Abomey e Aplahoué) e dai tre del Quaternario (Sakété, Allada e Comé) i quali sono separati gli uni dagli altri dalla *Dépression de la Lama*; il secondo è un'area lunga 200 chilometri e larga 60 chilometri che in termini geologici appartiene al bacino degli Iullemmeden, bacino sedimentario che tocca diversi stati tra i quali Niger e Nigeria; il terzo è un bacino del tardo Precambriano che, in Benin, comprende l'area del fiume Pendjari (anche chiamato Oti) e dell'Atacora. A titolo informativo, in **Figura 6** è riportato un prospetto che mostra la cronologia delle varie ere geologiche.

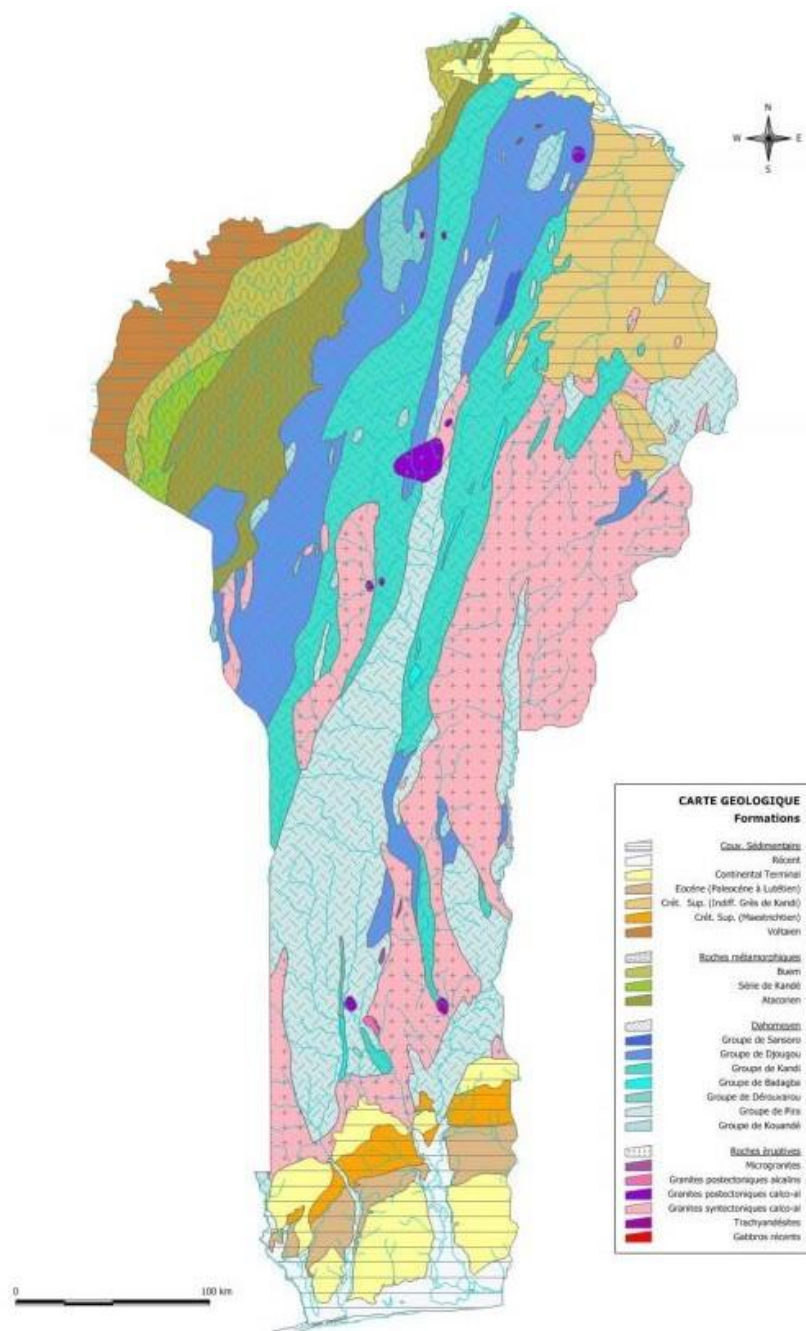


Figura 5 Carta geologica del Benin (rapporto UNICEF)

ERA	PERIODO	EPOCA	ETÀ (m.a.)
NEOZOICA (quaternaria)	Olocene		0,08
	Pleistocene		1
CENOZOICA (Terziaria)	Pliocene		11
	Miocene		26
	Oligocene		40
	Eocene		60
	Paleocene		70
MESOZOICA (Secondaria)	Cretaceo-----	Superiore	
		Inferiore	135
	Giurassico-----	Malm	
		Dogger	
		Lias	180
	Triassico-----	Superiore	
		Medio	
Inferiore		225	
PALEOZOICA (Primaria)	Permiano-----	Superiore	
		Medio	
		Inferiore	270
	Carbonifero-----	Superiore	
		Medio	
		Inferiore	350
	Devoniano-----	Superiore	
		Medio	
		Inferiore	400
	Siluriano-----	Superiore	
		Medio	
		Inferiore	440
Ordoviciano-----	Superiore		
	Medio		
	Inferiore	500	
Cambriano-----	Superiore		
	Medio		
	Inferiore	600	

Figura 6 Cronologia ere geologiche (Holmes, 1959)

Dal punto di vista idrogeologico, il rapporto UNICEF intitolato “*Republique du Bénin – Etude de faisabilite des forages manuels: identification des zones potentiellement favorable*” descrive due tipi di acquiferi per il Benin.

I primi sono gli acquiferi continui con porosità interstiziale, caratteristici del bacino costiero e del bacino di Kandi. Queste falde sono raggiungibili più facilmente rispetto a quelle del letto di roccia e contengono grandi quantità di risorsa idrica. Nel bacino sedimentario costiero si distinguono due acquiferi principali di questo tipo, separati da uno spesso strato di argilla:

- l'acquifero al di sotto del *Continental Terminal* (Miocene superiore – Pliocene) che è caratterizzato da ricariche casuali, anche se nelle zone meridionali lo strato d'acqua sta crescendo velocemente;
- la falda acquifera delle sabbie del Cretaceo superiore, che è libera a nord, ma a sud è sormontata da argille e marne.

Anche il bacino di Kandi è molto interessante dal punto di vista idrogeologico, sebbene sia ancora relativamente inesplorato; anche qui si possono distinguere due importanti acquiferi:

- uno strato di arenarie fini e microconglomerati risalenti al Paleozoico inferiore, presente in alcune aree della parte centrale del bacino, talvolta sormontata dal *Continental Terminal*. È probabilmente la falda acquifera maggiormente sfruttata nell'ambito dei programmi di perforazione idraulica nei villaggi grazie al fatto che la probabilità di successo quando si va a perforare è superiore all'80%;
- un secondo strato di arenaria, questa volta un po' più grossolana. Generalmente è intrappolata sotto le argilliti e le siltiti degli strati superiori, ma, verso i depositi alluvionali del Niger, potrebbe sgorgare naturalmente perché ha una pressione sufficiente. È la falda più grande del bacino, ma è poco conosciuta perché molto profonda e perché viene raramente sfruttata dalle opere idrauliche dei villaggi.

Gli altri tipi di acquifero presenti in Benin sono quelli discontinui con porosità a fessura. La loro struttura è un po' più complessa di quella degli acquiferi precedenti in quanto l'acquifero si può dividere in uno strato alterato, che è lo strato con proprietà capacitive, e in uno strato fessurato, che invece consente il movimento e la trasmissione dell'acqua. Nel contesto beninese, arenarie e quarziti hanno poca alterazione, gli scisti vengono alterati, ma formano argille plastiche impermeabili mentre i micascisti si decompongono in sabbia argillosa relativamente permeabile. In genere questi tipi di acquifero hanno basse permeabilità, comprese tra $9 \cdot 10^{-7}$ m/s e 1 m/s e una porosità utile stimata compresa tra il 2% e il 5%.

Per quanto riguarda la copertura superficiale si nota, da **Figura 7** che procedendo da sud a nord essa varia e si hanno diversi tipi di suolo. In particolare, si osserva che la parte meridionale è più eterogenea di quella settentrionale che invece si presenta piuttosto monotona:

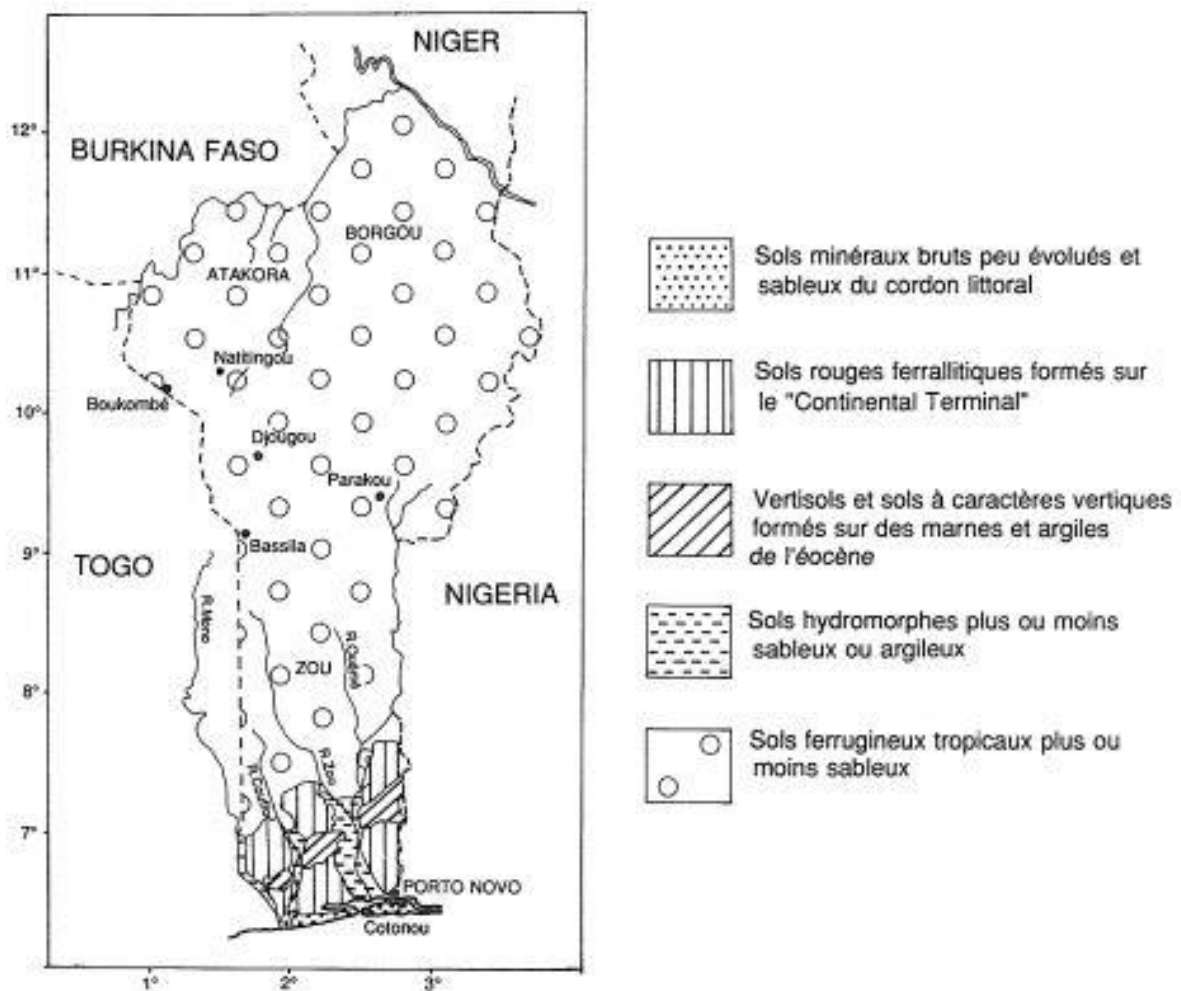


Figura 7 Distribuzione dei suoli (H. A. Azontonde, 1991)

lungo il litorale si ha un cordone stretto (la larghezza non raggiunge mai il chilometro) e sabbioso, perlopiù sabbia grossolana, formato da minerali grezzi e poco evoluti che in figura è indicato con una trama punteggiata. In quest'area la conducibilità idraulica è molto elevata a discapito di una capacità di ritenzione idrica piuttosto bassa; in questi tipi di terreni si è registrata una riserva d'acqua di 40 mm a 30 cm di profondità e 70 mm a 60 cm di profondità (H.A. Azontonde, 1991). Leggermente più a nord, nel bacino sedimentario meridionale, si trovano dei suoli, tipici di climi caldi e umidi, contaminati da composti del ferro e dell'alluminio che donano un colore rosso al paesaggio (suoli ferralitici) e caratterizzati da foreste semi-decidue: questi tipi di suolo occupano il 10% della superficie del Benin e sono caratterizzati da un'elevata alterazione dei minerali primari causata da un'intensa lisciviazione che si ha quando il mezzo è molto drenante. Inoltre, all'interno del bacino (che è indicato con strisce verticali), più precisamente lungo la *dépression de la Lama*, vi sono degli affioramenti di marne e argille dell'Eocene e diverse pianure alluvionali nelle quali i terreni idromorfici, indicati con una trama

a piccoli tratti orizzontali, sono coperti da foreste paludose e possono essere più o meno sabbiosi o argillosi; questi ultimi occupano le valli dei fiumi Oueme, Zou, Couffo, Mono e Niger (e affluenti) e si sviluppano in particolari ambienti fisico-chimici in cui sono favoriti i processi di ossido-riduzione. Hanno conducibilità idraulica media superficialmente mentre in profondità si hanno valori di conducibilità minori. Infine, nella parte centrale e settentrionale del paese vi è un basamento granitico-gneissico molto esteso sormontato da un suolo ferruginoso. Il suolo ferruginoso è simile al suolo ferralitico anche se presenta un'alterazione dei minerali minore e caratteristiche fisiche ed idrauliche peggiori; esso è molto esteso, occupa tra il 60% e il 70% della superficie totale del paese, ed è coperto da foreste aride, boschi e savana. In quest'area così ampia i suoli ferruginosi possono essere lisciviati ben drenati, lisciviati in acque profonde e lisciviati mal drenati.

Tutto quanto detto sui tipi di suolo permette di esprimere una certa correlazione tra il territorio e il clima:

- a sud vi sono i suoli che si sono sviluppati in un clima che prevede due stagioni piovose e due siccitose, caratterizzati da una vegetazione arbustiva fitta. Essi presentano buone proprietà fisiche e idrauliche quali alta permeabilità, buona stabilità strutturale e forte resistenza all'erosione, ma la riserva di acqua non è consistente;
- nel centro e a nord vi sono i suoli che si sono sviluppati in un clima che prevede una stagione piovosa e una siccitosa, caratterizzati da una tipica vegetazione di savana. In questo caso le proprietà fisiche e idrauliche sono peggiori e la riserva d'acqua è quasi nulla.

1.2 Caratterizzazione meteorologica

Il clima sulla Terra è determinato da un insieme di fattori tra cui l'orbita terrestre, la forma del globo e l'inclinazione dell'asse polare. Proprio i tre fattori citati causano una distribuzione del calore che non è omogenea su tutta la superficie, ma evidenzia anzi delle peculiarità in base alla latitudine dell'area di riferimento e al periodo dell'anno. Ciò è immediatamente comprensibile dal grafico riportato in **Figura 8** nel quale si può apprezzare la distribuzione spatio-temporale della radiazione solare in ingresso nell'atmosfera.

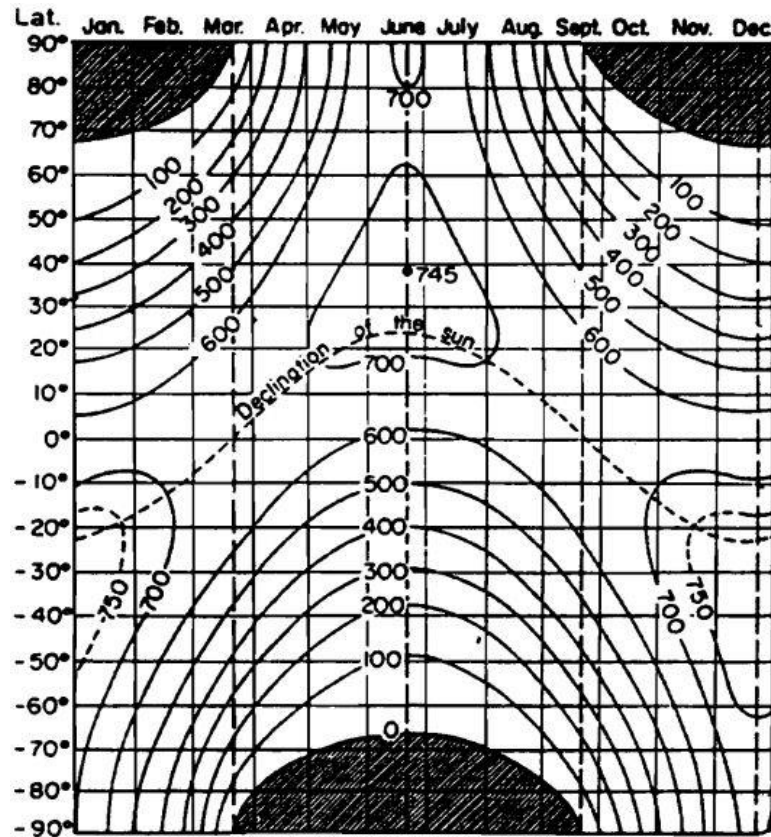


Figura 8 Distribuzione spatio-temporale della radiazione solare in ingresso nell'atmosfera: le curve rappresentano l'energia solare ricevuta dalla superficie terrestre a livello del mare [cal/cm²/g]. Nel calcolo si è considerato un coefficiente di trasmissione pari a 0.7 (Disegno di J.P. Debuiche - Le Barbé et al., 1993)

In linea teorica, se si potesse trascurare la rotazione della Terra, la circolazione atmosferica sarebbe descritta da due sole grandi celle convettive con i rami discendenti sui poli e con i rami ascendenti in prossimità dell'equatore meteorologico per il cui significato si rimanda al seguito (treccani.it).

Il Benin occupa una porzione di globo la cui latitudine è compresa tra 6°15' N e 12°30' N per cui in linea generale si può affermare che appartiene ad una zona intertropicale calda e umida. La temperatura media è piuttosto elevata e si registra un'escursione termica media giornaliera di 5°C a sud e 10°C a nord. Sia la temperatura che l'evapotraspirazione potenziale media aumentano man mano che si procede verso nord: si passa da 26°C di temperatura e 3 millimetri al giorno di evapotraspirazione nel sud a 35°C di temperatura e 7 millimetri al giorno di evapotraspirazione nel nord. Le precipitazioni, di cui si parlerà approfonditamente più avanti, hanno valore medio che varia da 900 millimetri all'anno nell'estremo nord e nel sud-ovest a 1400 millimetri all'anno nel sud-est.

Tale clima è definito, oltre che dalla latitudine propria dell'area, anche dall'azione piuttosto influente di due venti: l'aliseo marittimo e l'aliseo continentale (o Harmattan). Gli alisei non sono venti particolarmente forti, presentano un minimo a fine estate e un massimo a fine inverno e sono caratteristici delle regioni tropicali (approssimativamente nella fascia compresa tra 30°N e 30°S), sono costanti in intensità e direzione e spirano da nord-est a sud-ovest nell'emisfero boreale e da sud-est a nord-ovest nell'emisfero australe; sono facilmente riconoscibili sopra le masse oceaniche e sono generati dalla differenza di pressione che c'è tra la fascia equatoriale (molto calda, pressione bassa) e la fascia tropicale (più mite, pressione più alta). Vengono deviati dalla forza di Coriolis, una forza fittizia che si sviluppa, prendendo come sistema di riferimento la Terra, a causa della rotazione della Terra stessa intorno al proprio asse.

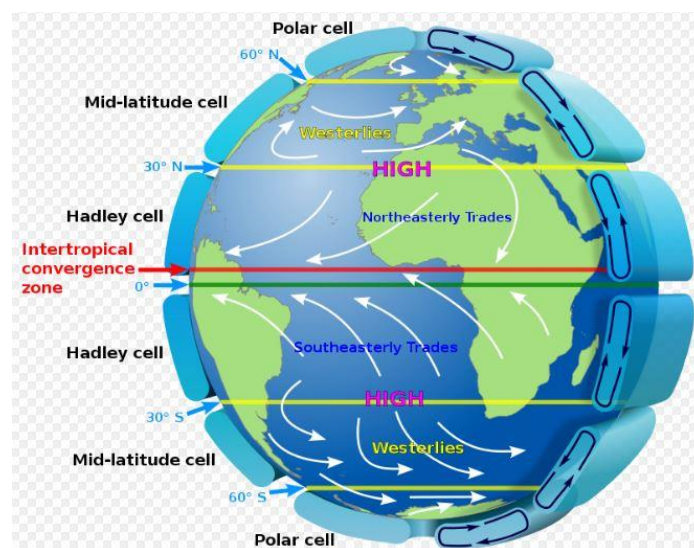


Figura 9 Schema dei venti (Wikipedia)

Come deducibile dalla **Figura 9** i due sistemi sono divisi da una sorta di zona di calma coincidente con l'equatore meteorologico (definito anche equatore termico) il quale è leggermente più a nord dell'equatore geografico; nonostante ciò vi sono comunque degli "sconfinamenti" abbastanza frequenti, specie nelle regioni atlantiche. Prendendo ad esempio l'emisfero boreale, come nel caso del Benin, si può affermare che durante l'inverno l'aliseo di nord-est supera l'equatore e arriva fino a 10°S di latitudine presentandosi, a causa della rotazione terrestre, come vento di nord-ovest, mentre durante l'estate è l'aliseo di sud-est che va ad interessare la zona tropicale boreale presentandosi come vento meridionale a basse latitudini e sud-occidentale a latitudini più alte. Quest'ultimo caso è esplicativo del fatto che, seppur il Benin si trovi poco sopra all'equatore meteorologico, subisce l'influenza dell'aliseo marittimo proveniente da sud il quale, proprio a causa della sua provenienza, conferisce umidità

al clima della zona. L'altro aliseo che influenza l'area è quello continentale, anche detto Harmattan, il quale presenta caratteristiche molto differenti dall'aliseo marittimo. A tal proposito, in letteratura vi è una certa approssimazione del termine che viene utilizzato sia come sinonimo di aliseo continentale che come termine indicante un vento a sé stante; in tale elaborato, i termini "Harmattan" e "aliseo continentale" sono considerati sinonimi, così come descritto nel rapporto UNICEF République du Bénin - Etude de faisabilité des forages manuels: identification des zones potentiellement favorables). L'Harmattan è un vento secco, irregolare e talvolta molto intenso che spira da nord-est; generalmente imperversa da novembre a marzo e la sua peculiarità è legata al fatto che, soffiando dal deserto verso la costa atlantica, trasporta particelle di polvere molto fini, di dimensione compresa tra 0.5µm e 10µm, che in casi estremi provocano forti disagi. Se l'aliseo marittimo rende l'area di interesse più umida perché trasporta con sé goccioline d'acqua, la conseguenza del flusso dell'Harmattan è una generale siccità associata a polvere in sospensione.

Ciò che è stato appena spiegato riguarda la superficie del Benin nella sua totalità, ma all'interno della stessa superficie si possono distinguere tre zone climatiche differenti per piovosità e temperatura dell'aria:

- una zona climatica subequatoriale che interessa l'area che va dalla costa fino alla città di Djidja, nel dipartimento di Zou; qui piove per circa 250 giorni all'anno e si alternano quattro stagioni, due piovose e due siccitose. La stagione piovosa più lunga va da marzo a luglio mentre quella più corta da settembre a metà novembre.
- una zona climatica sudano-guineana che si estende nella parte centro-meridionale del paese. Qui si hanno circa 200 giorni di pioggia concentrati in un'unica stagione nel periodo che va da aprile a ottobre;
- una zona climatica strettamente sudanese che riguarda tutto il nord del paese a partire dalla città di Parakou. Le piogge cadono per circa 145 giorni all'anno, tra maggio e settembre.

1.3 Caratterizzazione idrografica

Il Benin beneficia di una rete abbastanza estesa di corsi d'acqua permanenti i cui regimi, come è ovvio, seguono l'andamento delle stagioni: durante le stagioni piovose si hanno grandi portate e rischio di alluvioni mentre nelle stagioni siccitose i flussi sono molto minori. In generale i fiumi seguono due direzioni principali, rispettivamente scorrendo in direzione nord verso il fiume Niger o in direzione sud verso l'oceano Atlantico. In quest'ultimo caso i corsi d'acqua vanno ad alimentare laghi e lagune caratteristici della regione costiera. La maggior parte dei corsi d'acqua ha origine nel massiccio dell'Atacora, ma si contano comunque diverse eccezioni.

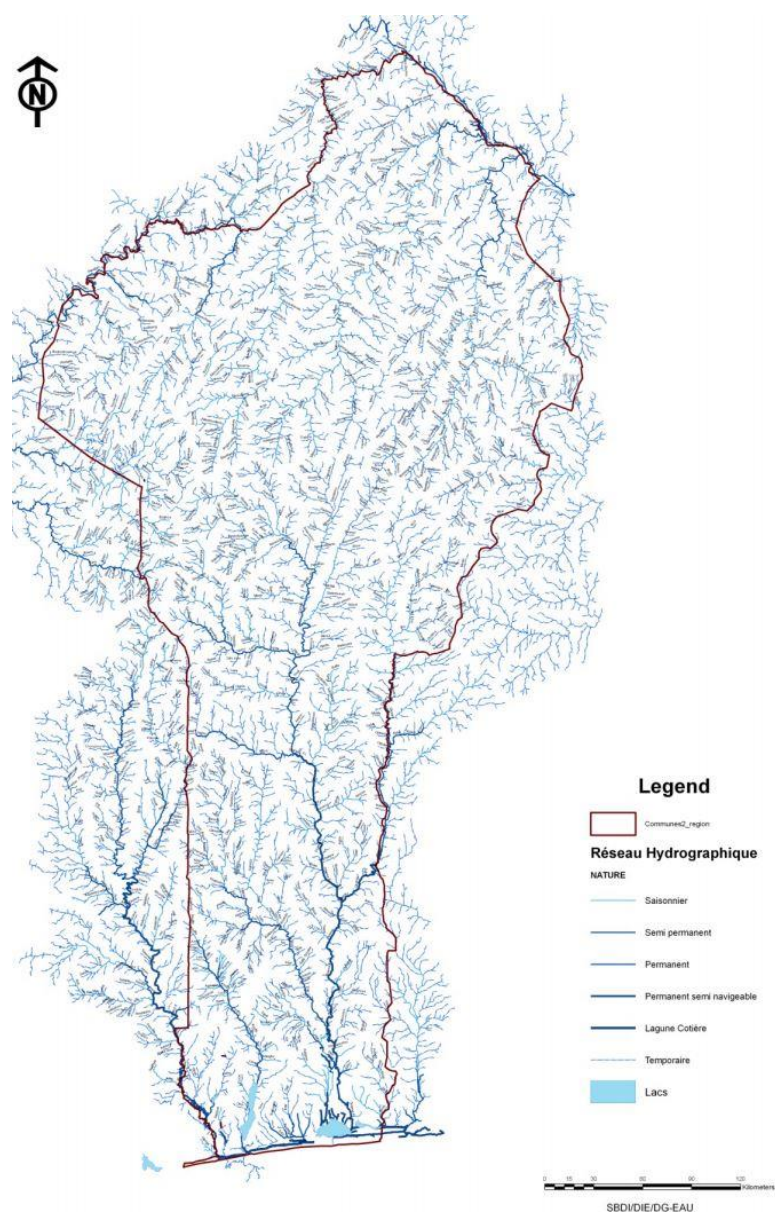


Figura 10 Mappa idrografica del Benin (Azonsi et al., 2008)

Il paese presenta una fitta rete idrografica (**Figura 10**) e si possono distinguere, oltre a molteplici sottobacini (**Figura 11**) sei grandi unità idrografiche (*Le Barbé et al., 1993*):

- il bacino del fiume Pendjari;
- il bacino del fiume Niger;
- il bacino del fiume Ouémé;
- il bacino del fiume Couffo;
- il bacino del fiume Mono;
- il bacino del fiume Kéran.

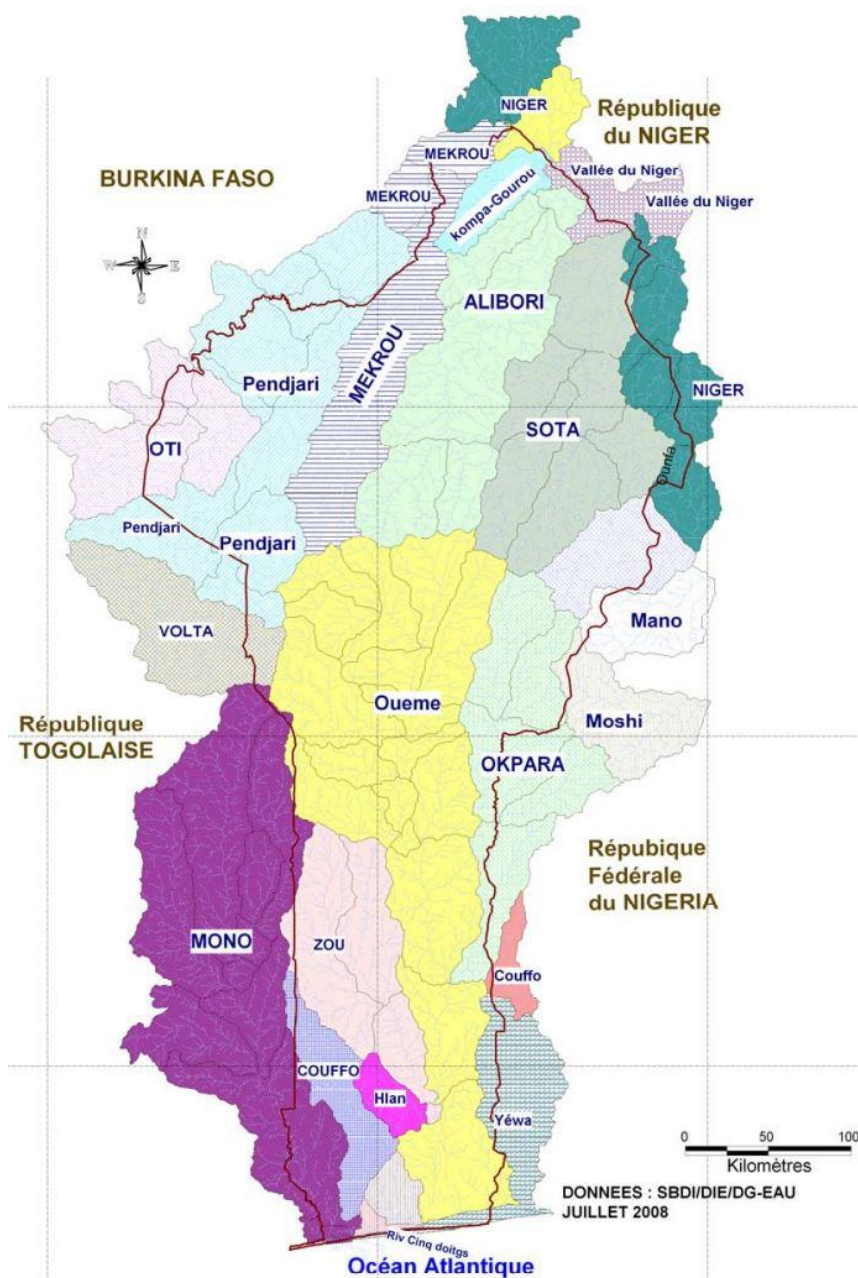


Figura 11 Divisione del Benin in sottobacini (*Azonsi et al., 2008*)

Il bacino del Pendjari si trova nel nord-ovest del paese (**Figura 13**). Il fiume che lo attraversa nasce nella catena dell'Atacora, ai piedi della falesia Toukountouna, e scorre in direzione sud sud-ovest tra i due crinali della catena montuosa fino a raggiungere latitudine $11^{\circ}30'$. È formato dall'acqua che defluisce dalle pendici settentrionali degli altipiani della regione di Natitingou e che si incanala nelle gole dell'Atacora. Qui la pendenza del Pendjari è pari a 3.7 m/km e si distinguono tre assi principali di drenaggio che contribuiscono alla formazione del fiume principale, essi sono: la Sarga per 48km, il Kounne per 46 km e il Tigou per 27 km. Uscito fuori dal massiccio poi si dirige verso SO diminuendo la sua pendenza: si passa da 1.5 m/km appena fuori dai monti Atacora a 0.36 m/km al confine col Burkina Faso fino a raggiungere, nel tratto finale una pendenza molto modesta equivalente a 0.16 m/km. Lungo il percorso riceve anche le portate degli immissari di destra, proveniente dal Burkina Faso, che sono il Kourtiagou, il Doudodo e il Singou e degli immissari beninesi di sinistra. Il Pendjari, che presenta bassi valori di portate e un regime piuttosto irregolare, finisce poi il suo corso in Ghana, nel fiume Volta.

Il bacino del Niger (**Figura 12**), oltre 2 milioni di km^2 di estensione, è dominato appunto dal fiume omonimo che scorre dai monti Loma, al confine tra Guinea e Sierra Leone, per 4000 km fino a sfociare nel golfo di Guinea con un delta estesissimo. Il suo corso segue una mezzaluna che si spinge a nord fino all'ingresso del Sahara per poi ripiegare (*Niger Bend*) e procedere verso sud toccando, tra gli altri, anche il territorio beninese. È un fiume navigabile e questo rappresenta un grande vantaggio per le economie locali. Il Niger, per 135 km, segna la linea di frontiera tra il Benin e la Repubblica del Niger. In questo tratto segue la direzione nord-ovest sud-est e riceve, da destra, quattro affluenti. Il primo di questi è il fiume Mekrou, lungo 480 km e con un bacino pari a 10500 km^2 . Esso nasce a 460 metri di altitudine nelle montagne di Birni, nell'ovest del paese, e presenta un andamento piuttosto tortuoso a causa della natura delle rocce attraversate. La pendenza è modesta lungo tutto il tratto e segna un valore medio di 0.45 m/km. Il secondo affluente di destra del Niger è il Kompa Gourou, un corso di rilevanza relativa che nasce a 300 metri di altitudine nella serie del Kandi e dopo appena 66 km raggiunge il *Continental Terminal* all'interno del quale si incanala; la sua pendenza non supera mai il m/km e la sua rete idrografica è piuttosto contenuta. Un altro degli affluenti del Niger è il fiume Alibori che ha la sua fonte a 360 metri di altezza, nel massiccio granitico di Kita, e che scorre, seppur con diverse anse e gomiti, da sud sud-ovest a nord nord-est. Nonostante una pendenza media non elevata, intorno ai 0.5 m/km, lungo il suo corso si possono trovare cascate e piccoli salti d'acqua. Poco prima della confluenza nel Niger, l'Alibori va a lambire le scarpate di arenaria del *Continental Terminal*, seguendo in questo tratto una direzione ovest nord-ovest, est

sud-est. Il suo bacino è delimitato a ovest dal gruppo di Kandi e ad est da colline quarzitiche del gruppo Badagba; da entrambi i rilievi appena citati scendono piccoli corsi d'acqua che vanno ad alimentarlo. L'ultimo dei principali affluenti di destra del Niger è la Sota. Questo fiume nasce sui pendii orientali dell'altopiano di arenaria di Kalale, a 400 metri di altitudine e, a differenza dei precedenti, ha una pendenza elevata, da 4 m/km a 8 m/km, specie nei primi tratti del suo corso. I suoi affluenti di maggior importanza sono quelli che provengono dalle formazioni gneissiche (Tassine, Bouli, Irane).



Figura 12 Bacino del Niger nel nord-est del paese (Wikipedia)

Il bacino del fiume Ouémé occupa un'area abbastanza estesa, circa 50000 km², spiegata dal fatto che l'Ouémé è il fiume più grande del Benin (510 km). Tale fiume, che come tanti altri nasce nei monti Atacora, scorre verso il sud del paese ed è condizionato dal clima sudanese e, in piccola parte, dal clima subequatoriale, pur mantenendo un regime tropicale. A causa delle molteplici influenze il suo carattere è irregolare, con portate che variano da 50 m³/s a 460 m³/s nella zona di Porto Novo e da 10 m³/s a 900 m³/s se ci si sposta leggermente più a nord. Prima di sfociare nel golfo di Guinea, l'Ouémé dà vita al lago Nokoué (150 km²) e alla laguna di Porto Novo (35 km²). Data la pronunciata estensione lungo la latitudine, viene convenzionalmente diviso in due parti: il bacino superiore, situato più a nord e molto più ampio, e il bacino inferiore che sorge sulle formazioni sedimentarie localizzate nei pressi della costa sud. A sua volta, nella rete idrografica dell'Alto Ouémé, si possono distinguere tre sottoreti corrispondenti a:

- sottobacino della riva sinistra (valli dell'Alpouro), caratterizzato da pendenze che vanno da 1 m/km a 2 m/km e da spartiacque composti da granito o gneiss. In quest'area gli

affluenti più importanti sono l'Alpouro (bacino da 2010 km²), lo Yérou (2590 km²) e l'Okpara (10000 km²);

- rete idrografica del nord-ovest, posta sulle fiancate del massiccio dell'Atacora a nord e del massiccio di Aledjo a ovest. È una rete molto fitta in cui i vari affluenti scorrono nelle direzioni ovest est e nord-ovest sud-est prima di confluire nell'Ouémé. Tra i più importanti si citano il Téro (bacino da 3320 km²) e l'Adjiro (2151 km²);
- la rete idrografica del bacino del fiume Zou. Essa è inizialmente costituita da due assi paralleli coincidenti col fiume omonimo (8440 km² per 250 km di lunghezza) e col fiume Agbado (2703 km² per 109 km di lunghezza) che inizialmente seguono direzione nord sud e poi virano seguendo la direzione nord-ovest sud-est. Successivamente i due si congiungono e vanno ad alimentare l'Ouémé.

Dalla confluenza tra Zou e Ouémé in giù, si parla di Basso Ouémé o bacino inferiore (**Figura 14**). Qui l'Ouémé taglia il *Continental Terminal* con pendenze modeste, circa 5 metri di dislivello su 85 km, e la sua valle si presenta come una grande pianura alluvionale in cui giace un sistema idrografico molto complesso. Sulla riva destra si ha il fiume Sô che segue un percorso grossomodo parallelo a quello dell'Ouémé al quale è collegato tramite dei bracci che di fatto vanno poi a formare il delta dell'Ouémé stesso. Sia il Sô che l'Ouémé sfociano poi nel lago Nokoué (150 km²) che, a sua volta, è collegato al mare tramite il canale della laguna di Cotonou. Sugli altipiani permeabili della *Terre de Barre* non esiste quasi alcuna rete idrografica mentre nella *Depression de Lama* la rete idrografica è presente, seppur molto degradata.

Uno degli altri bacini che caratterizza il Benin è il bacino del Couffo. Questo fiume nasce nel Togo, a 240 metri sul livello del mare e inizialmente segue una direzione nord-ovest sud-est. Dopo un centinaio di chilometri esso va a tagliare le formazioni del *Continental Terminal* e piega gradualmente verso la direttrice N-S fino a terminare la sua corsa nel lago Ahémé (78 km²). La pendenza del Couffo è molto variabile: si passa dai 10 m/km in testa al bacino fino ai 0.3 m/km nell'ultimo tratto. Anche questo bacino copre una porzione della *Terre de Barre* dove, come già detto, la rete idrografica è assente.

Anche il fiume Mono ha un bacino rilevante per quanto riguarda l'idrografia beninese. Tale corso d'acqua nasce nelle montagne dell'Alédjo e, come gli altri, ha un regime tropicale. Nel

tratto meridionale segna il confine tra Togo e Benin e nei 148 km di flusso in quest'ultimo paese, il Mono segue una direzione che va da nord nord-ovest a sud sud-est; lungo il tragitto esso riceve dei contributi, sicuramente trascurabili, da piccoli affluenti. Nella prima parte del percorso il fiume scorre con una pendenza che raggiunge i 3 m/km ed è caratterizzato da piccole rapide; successivamente esso taglia il *Continental Terminal* e raggiunge un'ampia valle alluvionale in cui si segnala la presenza di laghi minori quali il Togbaji e il Toho e la laguna di Ouidah (40 km²). In questo tratto la pendenza si ridurrà molto fino ad un minimo di 0.06 m/km. Il Mono termina poi la sua corsa nel complesso lagunare di *Bouches du Roi*.

Di minor importanza, ma pur sempre da citare, è il bacino del Kéran. Esso si estende sui fianchi meridionali del massiccio dell'Atacora e sui versanti occidentali e sud-occidentali dei monti Tanéka. Tale bacino è caratterizzato da una fitta rete idrografica (Koumongou, Binaho, Wémou e altri) e da pendenze piuttosto elevate, specie quando i corsi d'acqua fluiscono in terreni meccanicamente molto resistenti.



Figura 13 Confine ovest del paese (Wikipedia)

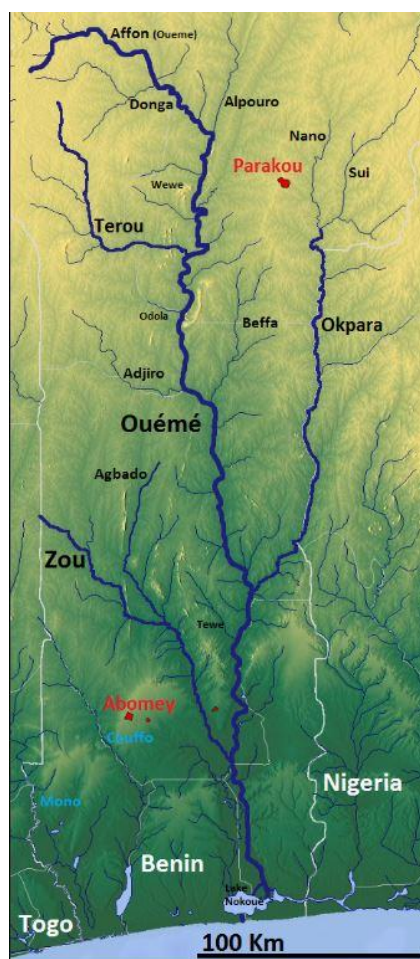


Figura 14 Carta fisica del sud del paese (Wikipedia)

Escludendo le acque del Niger, per il cui utilizzo sono necessari accordi tra i vari stati attraversati, il potenziale idrico del paese può essere stimato in 13 miliardi di metri cubi all'anno (Adegnika et al., 2009).

1.4 Gestione e utilizzo dell'acqua

Le zone umide del paese sono concentrate nel sud e ricoprono più di 250000 ettari di territorio: 2000 ettari di corpi idrici fluviali, 205000 ettari di pianure, soprattutto alluvionali, 3500 ettari all'interno di bacini artificiali e di serbatoi (nel 1999 si contavano 226 piccole dighe), 40000 ettari di complessi fluvio-lagunari. Per avere un'idea di quelle che sono le risorse d'acqua rinnovabili invece si fa riferimento a dati AQUASTAT, forniti dalla FAO, come illustrati in **Tabella 1**.

RISORSE D'ACQUA RINNOVABILI			
	Anno	Valore	Unità di misura
Precipitazioni medie		1039	mm/anno
		$117 * 10^9$	m ³ /anno
Risorse d'acqua rinnovabili - interne		$10.3 * 10^9$	m ³ /anno
Risorse d'acqua rinnovabili - totale effettivo		$26.393 * 10^9$	m ³ /anno
Indice di dipendenza		60.97	%
Risorse d'acqua rinnovabili - totale effettivo per abitante	2004	3815	m ³ /anno
Capacità totale delle dighe	2001	$40 * 10^6$	m ³

Tabella 1 AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005

Nonostante questi dati, le risorse idriche non sono sfruttate al meglio; facendo riferimento ai valori riportati in **Tabella 1**, si evince che i volumi d'acqua da utilizzare per le varie attività sono valutati su dati e ipotesi di consumo raccolti dalla Società beninese dell'elettricità e dell'acqua. Nel 2001, su un totale di 0.130 km³ di acqua, la distribuzione è stata quella descritta in **Figura 15**.

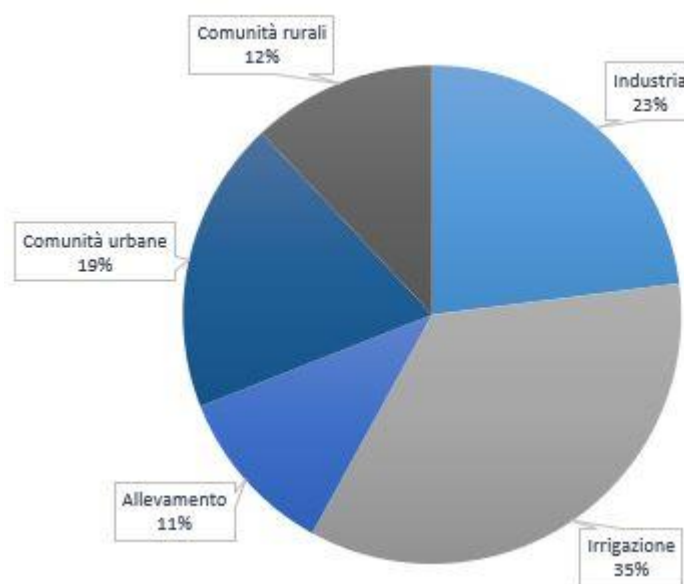


Figura 15 AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005

Per il 2025 sono previsti 1.068 km³ di prelievi d'acqua ripartiti in tal modo: 0.653 km³ per agricoltura e allevamento e 0.415 km³ per usi domestici (FAO, 2005). Una considerazione da fare riguardante l'acqua, i suoi utilizzi e i vari prelievi concerne le acque sotterranee all'interno delle falde: non essendoci dati a sufficienza è difficile andare a stabilire con esattezza dei volumi che, però, potrebbero essere influenti sul bilancio globale. Si suppone che la capacità di ricarica media annuale di una falda sia pari a circa 1.9 miliardi di metri cubi

mentre i prelievi annuali da falda siano circa 0.03 miliardi di metri cubi, il che sta a significare che viene sfruttato meno del 2% del potenziale medio di una falda; è stato stimato che per soddisfare le esigenze nel lungo termine sarà necessario portare questo valore dal 2% al 14%. Tuttavia, questi dati medi nascondono una abbondanza relativa, infatti se da un lato nelle aree a sud del paese il potenziale delle acque sotterranee potrebbe coprire ampiamente le richieste, dall'altro nelle aree del centro e del nord del paese si è appurato che l'apporto idrico da fonti sotterranee non sarà sufficiente e per questo si dovrà considerare anche un contributo da parte delle acque superficiali. Le istituzioni che si occupano delle acque sotterranee in Benin sono la *Société nationale des eaux du Bénin* (SONEB) per la fornitura nelle aree urbane e la *Direction Générale de l'Eau* (DG-Eau).

Per quanto concerne invece la gestione generale delle risorse idriche, in Benin essa è delegata a tre differenti ministeri che dovrebbero lavorare sinergicamente per raggiungere gli obiettivi preposti, anche se ci sono delle sovrapposizioni di giurisdizione. Questi sono:

- *Ministère des mines, de l'énergie et de l'hydraulique* (MMEH), responsabile del monitoraggio relativo all'evoluzione quantitativa dell'acqua, all'utilizzo dell'acqua potabile da parte della popolazione e alla produzione di energia attraverso la *Direction de l'Hydraulique*, la *Direction de l'énergie* e la *Société béninoise d'électricité et d'eau*;
- *Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche* (MAEP), responsabile per l'utilizzo dell'acqua per agricoltura, allevamento, acquacoltura, gestione delle foreste e rimboschimento. Anche qui vi sono diverse direzioni tra le quali la *Direction du génie rural* e la *Direction de l'élevage*;
- *Ministère de l'environnement de l'habitat et de l'urbanisme* (MEHU), di cui fanno parte la *Direction de l'environnement*, la *Direction de l'aménagement du territoire*, l'*Agence béninoise pour l'environnement* e la *Commission nationale de développement durable*.

Da quanto descritto sopra è chiaro che tutto ciò che ruota intorno alla risorsa idrica e alla sua gestione è promosso dal settore pubblico che ha veicolato molti finanziamenti sulla realizzazione di piani e strutture a breve e medio termine. Ciò è avvenuto in controtendenza con i primi interventi effettuati nel settore, i quali erano dovuti principalmente a donazioni e sovvenzioni private.

I prelievi di acqua da parte degli utenti però restano piuttosto disorganizzati e incontrollati: al momento non vi è un apparato legislativo ben definito, specie per quanto concerne l'agricoltura, e per questo l'efficienza delle reti pubbliche non è ottimizzata. Tali reti vengono utilizzate fino a quando sono funzionanti per poi essere abbandonate dagli stessi contadini, in attesa della manutenzione. Per ovviare a questo problema sono state create le cosiddette Associazioni degli Utenti Idrici il cui obiettivo finale è quello di arrivare a creare delle *Agences de bassin et de sous-bassin*. Il discorso è diverso per le reti private che sono tenute abbastanza bene anche perché non sono soggette a nessun tipo di onere fiscale.

Sempre facendo riferimento al rapporto sul Benin redatto dalla FAO nel 2005, si evidenzia che il quadro legislativo, legale e regolamentare a disposizione del paese in materia di gestione delle risorse idriche, all'anno 2005, poggiava sulle seguenti disposizioni:

- legge sul regime forestale della Repubblica del Benin, n.93-009 del 2 luglio 1993;
- legge quadro sull'ambiente, legge n.98-030 del 12 febbraio 1999;
- codice dell'acqua e codice di sanità pubblica, risalenti a prima dell'indipendenza avvenuta nel 1960. Come ovvio essi sono obsoleti, per cui è in atto una fase di aggiornamento con la possibilità di una fusione dei due testi;
- codice di terra che è stato sviluppato e validato nel 2001.

Un documento del 2009 aggiunge, oltre a quelle già citate, anche:

- il documento sulla politica nazionale per l'acqua;
- la strategia nazionale di gestione delle risorse.

Oltre a questo, il paese ha aderito ad una serie di convenzioni internazionali relative all'ambiente, all'acqua e ai servizi igienico-sanitari. Tra queste vi è la *convenzione di Ramsar* o *Convenzione sulle zone umide di importanza internazionale* stipulata nel 1971, la *Convenzione quadro sui cambiamenti climatici*, nota anche come Accordo di Rio, stipulata nel 1992 e dalla quale si è arrivati al celebre Protocollo di Kyoto del 1997 e la *Convenzione sul controllo contro la desertificazione* del 1994.

Secondo il documento *Evaluation de la gouvernance de l'eau au Bénin* redatto dal *Partenariat Mondial de l'Eau*, i problemi legati alla gestione delle risorse idriche in Benin sono molteplici: si cita l'inadeguatezza del quadro istituzionale che predilige una gestione settoriale della risorsa, la molteplicità degli organi decisionali che spesso non collaborano tra loro, la mancanza di veri

strumenti decisionali e la difficoltà di applicazione di codici e leggi. Se a questo si aggiungono anche dei deficit nella conoscenza della risorsa idrica e nell'affidabilità delle strutture pubbliche, ecco che il quadro complessivo appare tutt'altro che roseo.

CAPITOLO 2 – Dati di pioggia

Per poter perseguire l'obiettivo della tesi è necessario andare a reperire dei dati, in questo caso relativi alle precipitazioni, che siano quantitativamente e qualitativamente sufficienti. L'importanza di avere un quantitativo di dati adeguato, specialmente nei processi fisici, è legata al fatto che maggiore è il numero di dati che si hanno a disposizione e migliore sarà la descrizione dell'evento o della situazione che si sta prendendo in analisi. Se, per assurdo, non si conoscesse il numero dei giorni di ogni mese dell'anno, ma si conoscesse solo il numero dei giorni di gennaio, marzo, maggio e luglio allora si potrebbe pensare che tutti i mesi che compongono un anno abbiano 31 giorni, il che non è rappresentativo della realtà ed è definito "errore di campionamento". La situazione sarebbe diversa se invece di avere informazioni su 4 mesi su 12 si avessero informazioni su 10 mesi su 12: non si raggiungerebbe ancora il caso ideale, ma il grado di rappresentatività sarebbe maggiore. I dati da ricercare poi, per soddisfare i requisiti qualitativi, devono essere affidabili, quindi devono avere un margine di aleatorietà quanto più ridotto possibile.

2.1 Database: fonti e caratteristiche

Il database utilizzato per lo studio è il CRU TS4.03 (crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/) per il quale non è stato ancora fornito un documento descrittivo ed esplicativo. Tale database è la versione aggiornata del CRU TS3.10 per il quale invece è stato fornito un articolo (*Harris et al., 2014*) e al quale articolo si farà riferimento nel seguito.

Il CRU TS3.10 è stato sviluppato nel 2009 dal *Climate Research Unit* della *University of East Anglia*. I dati sono strutturati seguendo una prima griglia le cui celle presentano una risoluzione di 5° (**Figura 16**) e una griglia più dettagliata della precedente composta da celle con risoluzione 0.5° (**Figura 17**). La copertura del globo è totale, ad eccezione dell'Antartide.

Le variabili climatiche sono state prese in considerazione su scala mensile e sono:

- temperatura media (TMP);
- precipitazioni totali (PRE);

- intervallo di temperatura diurno (DTR);
- temperatura massima (TMX) e minima (TMN);
- pressione di vapore (VAP);
- copertura nuvolosa (CLD) e numero dei giorni di pioggia (WET);
- numero dei giorni di gelo (FRS);
- evapotraspirazione potenziale (PET).

Le prime tre variabili sono definite primarie in quanto sono quelle dalle quali si parte per ricavare le altre, definite variabili secondarie. L'operazione che ha portato alla costruzione di un database così ampio ha necessitato di fonti iniziali dalle quali partire come la *World Meteorological Organization* (public.wmo.int/en) e il *National Climatic Data Center* (NCDC) della *US National Oceanographic and Atmospheric Administration* (noaa.gov/). La prima è un'organizzazione con scopi tecnici e scientifici nel campo della meteorologia, dell'idrologia e delle geoscienze, comprende 191 paesi ed è stata fondata nel 1873; è una delle agenzie delle Nazioni Unite e la sua sede centrale è a Ginevra in Svizzera. La seconda è una agenzia governativa statunitense con sede nel Maryland che si occupa di programmi per satelliti meteorologici e quindi studia il clima non solo a livello nazionale, ma anche globale.

Gli autori hanno avuto accesso ai dati climatici mensili scambiati tra i diversi paesi all'interno del WMO e, per gli ultimi anni del dataset, sono arrivati ad utilizzare 2400 stazioni posizionate in tutto il mondo, seppur con un certo numero di valori mancanti. Talvolta, scorrendo il database, sono presenti delle celle con dicitura “-999” che sta ad indicare l'assenza del valore corrispondente: ciò può avvenire sia perché il codice della stazione non è riconosciuto dal WMO o è assente, sia a causa di una reale mancanza della misura o dell'osservazione. Un'altra fonte di cui si è usufruito, ma che ancora non è stata citata, è la pubblicazione decennale redatta dal *World Weather Records* (WWR). Per quanto riguarda invece l'utilizzo di fonti nazionali riconducibili a scienziati o istituti di ricerca, la loro integrazione all'interno del database principale è risultata un po' difficoltosa a causa del fatto che spesso, in questi contesti, sono state adoperate stazioni sprovviste di codice identificativo WMO necessario per inquadrare nella rete WMO tutte le stazioni utilizzate per la misura. Nonostante ciò, vi sono state alcune fonti nazionali che hanno contribuito alla realizzazione del database, tra queste si annoverano l'*Australian Bureau of Meteorology*, il *National Meteorological Service* neozelandese e la scienziata canadese Lucie Vincent per quanto riguarda le serie canadesi. Come detto quindi il database si presenta come una griglia di celle che ricopre l'intero globo:

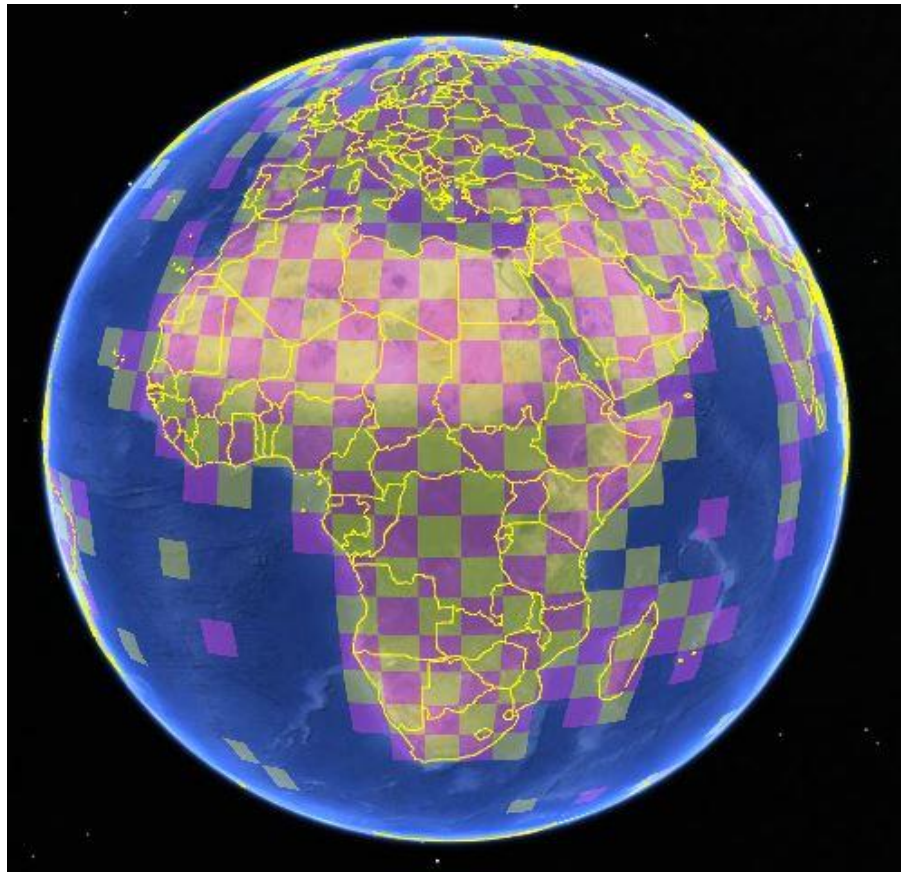


Figura 16 Celle di dimensione 5° per 5° (CRU TS4.03, 2009)

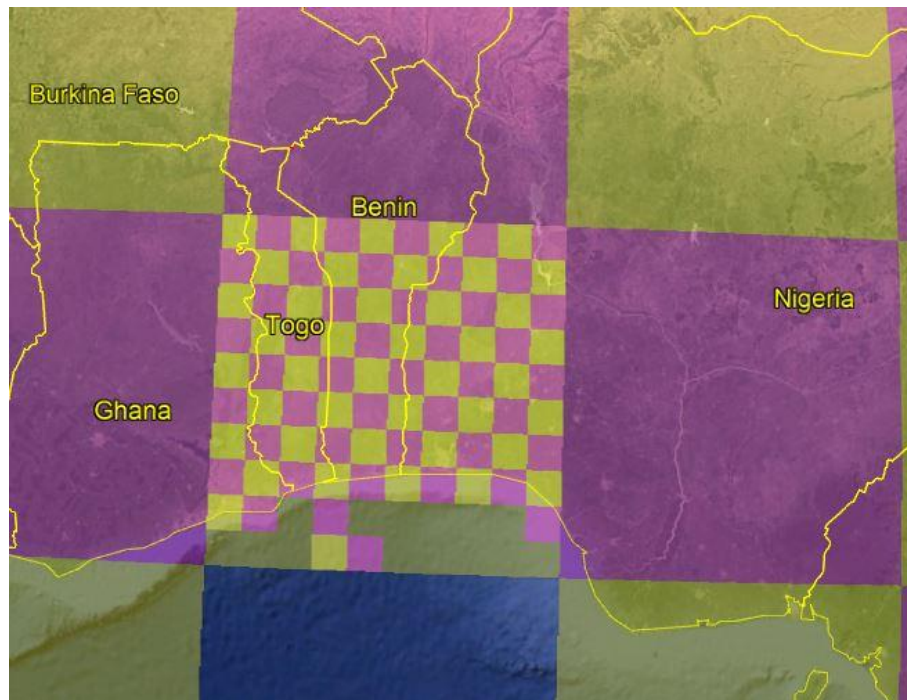


Figura 17 Celle di dimensione 0.5° per 0.5° (CRU TS4.03, 2009)

Per determinare le celle mostrate nelle immagini si è utilizzato il database *Terrainbase 5'* (creaf.uab.es/mirammon/mmr/examples/miombo/docs/database/dem5m/index.htm) che descrive, mediante le tre variabili topografia, elevazione e profondità del fondale marino, la superficie terrestre. I dati usati per la costruzione del dataset CRU TS rispondono tutti a dei requisiti definiti dagli sviluppatori:

- disponibilità minima temporale nel periodo dal 1961 al 1990;
- numero dei valori mancanti per ogni mese non superiore al 25%;
- assenza di valori anomali (i.e. aventi uno scostamento superiore a tre volte la deviazione standard dalla media o quattro volte per le precipitazioni).

Alla luce di tutto ciò si è notato che, per alcuni continenti, quasi la metà delle stazioni è stata esclusa dall'analisi a causa di periodi di tempo non sufficientemente lunghi per poter essere elaborati. Sono stati pochi invece, meno dell'1%, i valori esclusi perché anomali. La situazione è riassunta in **Figura 18**.

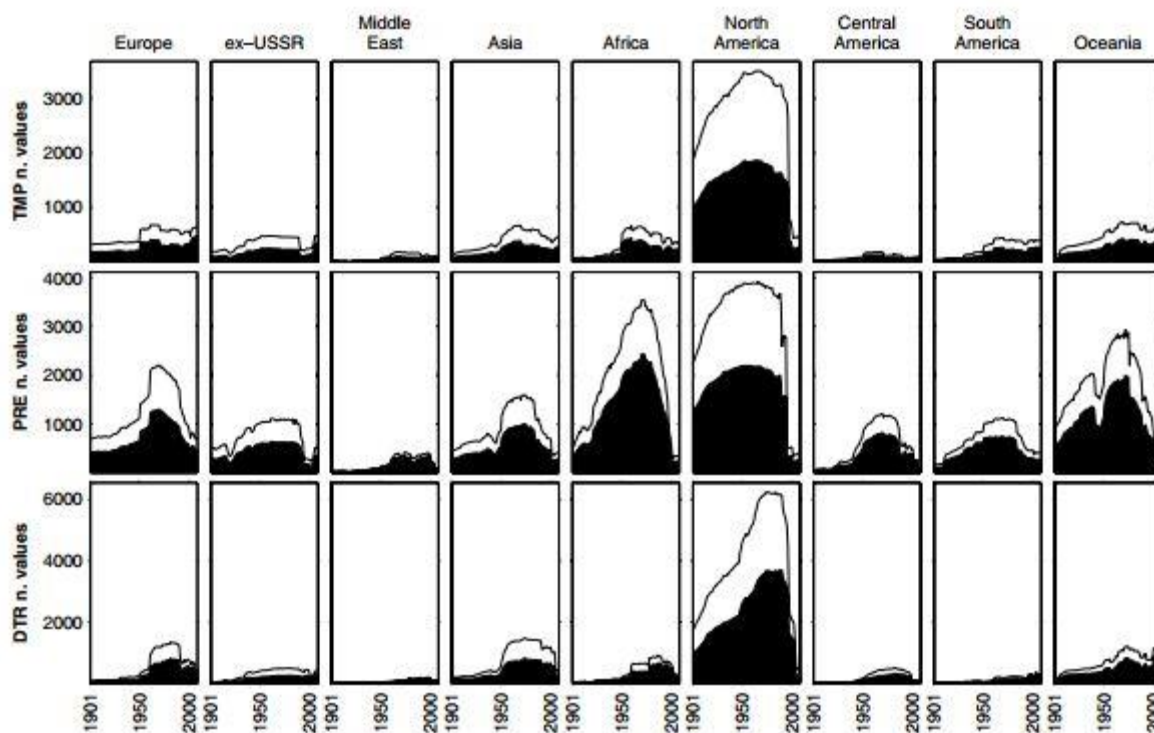


Figura 18 Numero di dati mensili per le variabili primarie temperatura (TMP), precipitazioni totali (PRE) e intervallo di temperatura diurna (DTR). L'area nera rappresenta il numero di dati effettivamente utilizzati, la linea continua indica il totale dei dati a disposizione. (Harris et al., 2014)

L'influenza della singola stazione sul dato finale varia sia nel tempo, che in base al tipo di variabile che si sta considerando. Ogni stazione accettata nel processo subisce un'operazione con la quale ai suoi valori mensili si sottrae il valore medio mensile calcolato nell'intervallo di tempo che va dal 1961 al 1990; così facendo associa ad ogni valore una "anomalia" rispetto alla media calcolata nel periodo suddetto, ovverosia la distanza del valore dalla media di riferimento. Ciò viene fatto perché i dati in questa forma sono più interpretabili e perché la dipendenza dall'elevazione risulta meno evidente. Vi sono però due eccezioni:

- i valori di precipitazione e di giorni piovosi. In questi casi l'anomalia viene calcolata in percentuale di modo che il valore pari alla media abbia anomalia dello 0% e un valore pari a zero abbia anomalia del -100%;

calcolo standard
$$x = x_a + x_m \quad (1)$$

calcolo percentuale
$$x = \frac{x_a x_m}{100} + x_m \quad (2)$$

dove x_m è il valore medio mensile e x_a è l'anomalia.

- i valori di copertura nuvolosa per i quali le anomalie sono calcolate in riferimento alle medie mensili del periodo 1995-2002 e successivamente convertite in anomalie del periodo 1961-1990.

Ciò detto, gli input che si danno al *gridding process*, ovvero il processo col quale si associano i dati ad una certa cella sul globo, per ogni lasso di tempo considerato sono i valori di anomalia delle stazioni disponibili e la posizione di ogni stazione. Le operazioni che si fanno per creare questa griglia sono principalmente due e vengono effettuate utilizzando due funzioni del linguaggio IDL (*Interactive Data Language*, linguaggio specializzato nell'analisi dei dati scientifici, sviluppato dalla *International Telephone and Telegraph*): la prima è la funzione "*triangulate*" che consiste nel creare delle triangolazioni che restituiscono la lista delle coordinate dei vertici di ogni triangolo composto. Una volta ottenuti questi dati e specificati la spaziatura della griglia, le anomalie e i limiti entro i quali effettuare le operazioni, si utilizza una funzione chiamata "*trigrd*" per ottenere la griglia formata da celle aventi dimensioni pari

a 0.5° i cui valori sono quelli risultanti dall'interpolazione lineare all'interno di ogni triangolo. Il passaggio finale poi prevede la riconversione del dato scritto sotto forma di anomalia in dato assoluto. Come mostrato dalle formule, per i dati di temperatura media (TMP) e di intervallo di temperatura diurno (DTR) si vanno semplicemente a sommare alle anomalie le medie mensili della stessa cella, mentre per i dati di precipitazione (PRE) le anomalie in percentuale vengono moltiplicate per le medie, divise per 100 e sommate alle medie stesse. Inoltre, per PRE e DTR, ogni valore negativo, che starebbe a significare uno scenario impossibile ovvero altezza di precipitazione negativa o temperatura massima minore della temperatura minima, viene eguagliato a zero. Si è quindi arrivati ad ottenere l'output ricercato: delle serie di valori relativi alle tre variabili primarie strutturati in celle sul globo che ne indicano l'area di interesse. Partendo dalle serie delle tre variabili PRE, TMP e DTR si ricavano poi le rimanenti variabili: generalmente le variabili principali vengono utilizzate per sintetizzare dati relativi alle variabili secondarie come VAP, WET o CLD. Utilizzando ipotesi, formule empiriche o semi-empiriche, trasformazioni lineari e fattori di scala si ottengono dei valori sintetici necessari per effettuare delle interpolazioni con i dati della variabile secondaria osservati. Anche in questo caso si ottengono delle anomalie che verranno poi convertite in dati assoluti.

$$VAP = 6.108 \cdot e^{\frac{17.27 \cdot TMN}{237.3 + TMN}} \quad (3)$$

$$WET = \left(\frac{PRE \cdot WET_m^{\frac{1}{0.45}}}{PRE_m} \right)^{0.45} \quad (4)$$

dove il pedice m sta ad indicare che si tratta di un valore medio

$$CLD = (DTR \cdot factor_j) + offset_j \quad (5)$$

dove $factor$ e $offset$ sono dei parametri calcolati nelle versioni precedenti del database e sono associati alla latitudine j (o, per meglio dire, ad una fascia compresa tra due latitudini).

Vi sono poi delle leggere variazioni di questo processo a seconda della variabile; ad esempio il numero dei giorni di gelo (FRS) è stimato solo sinteticamente, senza l'ausilio di dati osservati, servendosi di una funzione empirica che coinvolge le anomalie di TMP e di DTR.

$$FRS = 50 \cdot \cos\left(\frac{180}{24} \cdot \left((TMN + 14) - |12 - |x + 2|| \cdot 0.32\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right) + 50 \quad (6)$$

dove x è l'anomalia. Tale formulazione è valida per $TMN \leq -14$, nel caso in cui $-14 \leq TMN \leq 10$ allora FRS è pari al numero di giorni del mese.

I valori di temperatura massima (TMX) e minima (TMN) sono invece derivati matematicamente dai dati assoluti di TMP e DTR e, per questo, non ci si riferisce a loro come variabili primarie o secondarie, ma semplicemente come un'elaborazione analitica degli altri dati di temperatura.

$$TMN = TMP - \frac{DTR}{2} \quad (7)$$

$$TMX = TMP + \frac{DTR}{2} \quad (8)$$

In ultimo, l'evapotraspirazione potenziale (PET) si avvale dei dati assoluti di TMP, CLD, VAP, TMN e TMX e della media mensile della velocità del vento. L'introduzione di quest'ultimo parametro, che non è reperibile per tutto il globo, rende la stima dell'evapotraspirazione potenziale impossibile in alcune aree, specie sulle coste e intorno alle isole più piccole. Per la stima del valore di evapotraspirazione si utilizza la formula di *Penman-Monteith* rielaborata dalla FAO; tale formula sarà descritta e approfondita nel seguente capitolo.

Riassumendo quindi, i valori utilizzati nel seguito appartengono ad un database globale composto da dati climatici mensili con una risoluzione di mezzo grado e con una copertura che va da 60°S a 80°N. Le variabili climatiche incluse sono le dieci precedentemente elencate e il periodo a disposizione di questo studio è quello che va dal gennaio del 1901 al dicembre del 2009. I dati, recuperati da diverse fonti, sono stati selezionati e sono stati oggetto di un approfondito controllo della qualità che ha portato poi alla rimozione di dati scadenti o sospetti. L'interpolazione consente di avere valori relativi alle variabili primarie sulla quasi totalità della superficie terrestre mentre le variabili secondarie, che hanno meno copertura, sono state implementate con dati sintetici. Oltre ai dati veri e propri, il database comprende anche due set

di file diagnostici che permettono di risalire al processo col quale il singolo valore è stato derivato.

L'interfaccia impiegata dal database permette poi di recuperare i dati dalla singola stazione: in virtù del fatto che l'intervento descritto nel presente elaborato riguarda la città di Allada, i dati sui quali si lavorerà nelle pagine successive saranno presi dalla stazione di Allada (6.70N, 2.10E).

2.2 Intensità di pioggia

I dati a disposizione sono dati relativi alle precipitazioni e, per far riferimento all'afflusso meteorico in una determinata area e in un determinato tempo, si parla appunto di "intensità di pioggia" comprendendo con lo stesso termine anche quelli che sono gli afflussi solidi (neve, grandine) opportunamente convertiti. L'intensità di pioggia è strettamente correlata al concetto di altezza di pioggia, il quale può essere definito come "*l'altezza della lama d'acqua che si accumulerebbe in un tempo assegnato su una superficie orizzontale, qualora tutta l'acqua raccolta dalla superficie fosse trattenuta ed in assenza di perdite di ogni tipo*" (albertomontanari.it, 2018). Quello che distingue l'altezza di pioggia dall'intensità di pioggia è il tempo, nel senso che rapportando l'altezza di pioggia al tempo si perviene all'intensità; in linea generale, l'intensità di pioggia è maggiore dove l'evento è più breve. Tale intensità quindi è una grandezza che richiede la determinazione dell'intervallo di tempo nel quale la precipitazione si è manifestata. L'unità di misura che si usa è una lunghezza rapportata ad un tempo per cui nel presente lavoro si parlerà sempre in termini di mm/mese con qualche sporadica eccezione; per avere un riferimento fisico e realistico dell'intensità di pioggia basti pensare che 1 mm/h sta a significare che in un'ora, ipotizzando una superficie di un metro quadro, si è accumulato un quantitativo d'acqua alto 1 millimetro e, facendo le dovute conversioni, si otterrà che il volume di acqua precipitata risulterà pari a 1 litro.

Da quanto appena descritto si deduce che misurare l'altezza di pioggia, noto l'intervallo di tempo di interesse, è come misurare l'intensità. I metodi classici coi quali si vanno ad effettuare le misure dell'altezza della lama d'acqua prevedono l'utilizzo di pluviometri e pluviografi che, data la loro natura, forniscono delle misure puntuali.

Il pluviometro (**Figura 19**) è un recipiente con corpo cilindrico e con pareti lisce in acciaio al cui ingresso, consistente una sezione circolare orizzontale, è posto un imbuto raccogliitore che

ha la funzione di ridurre le perdite per evaporazione ed evitare errori sistematici dovuti al vento o agli schizzi causati dall'urto delle gocce nel pluviometro. Nella sezione di uscita del gambo dell'imbuto è posta una sottile rete metallica che serve per evitare intasamenti e per garantire il corretto funzionamento dello strumento. L'acqua che precipita nel pluviometro viene raccolta sul fondo oppure in un secondo recipiente più piccolo disposto all'interno del pluviometro stesso. Generalmente questi strumenti sono posti ad un'altezza di circa 1.5 metri, in luoghi aperti e il più possibile distanti da alberi ed edifici che potrebbero ostacolare la captazione dell'acqua. Sono degli strumenti ormai in disuso in quanto la lettura, che veniva effettuata una volta al giorno, restituisce una misura discreta col 5%-10% di errore su grandezza puntuale.



Figura 19 Schema di un pluviometro classico (albertomontanari.it, 2018)

Il sistema di misura col pluviometro ha subito poi due evoluzioni. Nel tempo, la tendenza è stata quella di procedere da una misura discreta, quindi per un numero limitato di istanti di tempo, ad una misura di tipo continuo. Gli strumenti che misurano l'altezza di pioggia in continuo sono detti pluviografi e, proprio grazie al tipo di misura, hanno il grande vantaggio di poter valutare le grandezze precedentemente citate su scale temporali più brevi, anche dell'ordine dei minuti. Inizialmente si introdusse una forma di automazione abbastanza primitiva che serviva a dare delle misure in continuo; essa prevedeva l'introduzione di un

galleggiante all'interno del serbatoio in cui l'acqua veniva raccolta e questo galleggiante era collegato ad un pennino orizzontale, quindi alla stessa altezza del galleggiante, che andava a segnare l'andamento dell'altezza della lama d'acqua su di un rullo rotante foderato con carta. Il sistema era poi completato da un sifone di svuotamento.

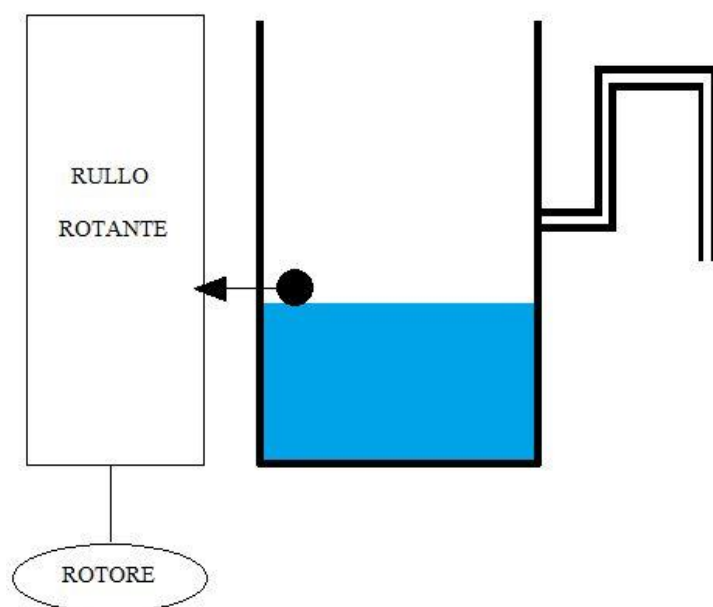


Figura 20 Schema di un pluviometro/pluviografo a pennino

Lo strumento descritto in **Figura 20** non è però utilizzabile ovunque; il suo limite infatti risiede nel fatto che, a meno di non trovarsi nelle zone più piovose della Terra, vi è un grande spreco di energia dato dalla circostanza che i giorni senza pioggia sono di più dei giorni piovosi e ciò ha portato alla successiva evoluzione che vede impegnato un sistema a bascula. Nel pluviografo a bascula (*tipping bucket*), un esempio del quale si può vedere in **Figura 21**, si trova una coppia di recipienti solidali ad una base basculante intorno ad un perno centrale; l'acqua va a riempire un recipiente per volta e, quando esso è colmo, il peso di acqua determina una modifica della posizione del baricentro. In questo modo il sistema si ribalta, facendo precipitare l'acqua raccolta in un recipiente vuoto e mandando a riempimento il secondo recipiente. Il sistema è progettato in modo tale che ogni volta che si ha una rotazione della bascula un sensore preposto invii un segnale al pennino che riporta tutto su carta. Le perdite possono raggiungere al massimo il 5%. Una grande differenza rispetto ai pluviometri è legata alla calibrazione: in questo caso è necessario calibrare in modo opportuno il pluviografo per evitare sottostime nella misurazione dovute al ribaltamento della bascula; questi errori crescono al crescere del numero dei ribaltamenti della bascula. Un'altra operazione che vede protagonista il pluviografo è la taratura

con la quale si va a verificare l'effettiva equivalenza, a livello volumetrico, dei recipienti piccoli moltiplicati per il numero di *switch* con il quantitativo di risorsa in ingresso. Altri accorgimenti legati al buon funzionamento dello apparecchio sono la rimozione di eventuale fogliame e altri tipi di vegetazione e la verifica dell'orizzontalità del piano di captazione dell'acqua.



Figura 21 Esempio di pluviografo a bascula (Stefano Cirilli - Università degli Studi di Trieste, 2015)

Nonostante i vari accorgimenti, è innegabile che siano comunque sempre presenti degli errori, sia sistematici che casuali. Un errore è definito sistematico quando si ripete anche una volta replicata la misura; proprio per questa sua natura esso è di difficile individuazione ed è considerato insito nello strumento. Un errore è definito casuale quando, viceversa, la reiterazione della misura tende ad annullarlo; questi tipi di errori si contrastano adoperando metodi statistici.

Nel caso specifico dei pluviografi, l'esempio principale di errore sistematico è da imputare alla presenza del vento che devia la traiettoria di caduta delle gocce più piccole e quindi più leggere. La conseguenza di ciò è che il volume di acqua intercettato all'interno dello strumento potrebbe risultare minore di quello che effettivamente arriva al suolo. Altri esempi di errori sistematici, ma meno influenti, sono legati all'evaporazione o alle gocce d'acqua trattenute all'interno di eventuali angoli vivi della struttura del pluviografo (che infatti si tendono ad evitare). Proprio l'evaporazione merita una chiosa: è necessario trovare un equilibrio tra il calore da respingere per evitare evaporazione ed il calore da apportare in caso di precipitazioni solide.

Le apparecchiature delineate in precedenza sono quelle più comuni e, da un certo punto di vista, più tradizionali e la loro descrizione è utile per iniziare a “maneggiare” il dato e capire

fisicamente quello che si descriverà poi analiticamente. Al giorno d'oggi sono state sviluppate diverse alternative per la misura dei dati di pioggia. Una di queste è il radar meteorologico: il grande vantaggio che si ottiene dal suo utilizzo è la possibilità di acquisire dati tridimensionalmente, monitorando volumi molto estesi sia in lunghezza che in altezza. Il suo funzionamento si basa sull'emissione di onde elettromagnetiche da una antenna con la quale si punta una direzione prestabilita e sulla interazione di queste onde con le precipitazioni. Quando le onde impattano sulle precipitazioni infatti vengono riflesse in tutte le direzioni compresa la direzione di ritorno al radar. A questo punto il radar, ricevuto il segnale di ritorno, valutata l'intensità del segnale stesso e calcolato il tempo trascorso riesce a stimare l'intensità di pioggia e la distanza dell'area e quindi, nota la direzione di trasmissione e la velocità dell'onda emessa, si può ottenere un quadro completo dell'evento meteorologico. Tutto ciò è possibile perché i radar che si usano in meteorologia lavorano con una lunghezza d'onda paragonabile alla dimensione delle gocce in caduta.

Un'altra alternativa per la misura è quella di utilizzare i satelliti: essi effettuano una valutazione cromatografica della copertura nuvolosa e da questa riescono a discernere delle misure che, nonostante siano poco precise, riescono a coprire delle porzioni di territorio molto estese.

Nelle prime pagine di questo paragrafo si è visto come la sperimentazione ha portato ad avere delle misure in continuo piuttosto che in discreto; quello che si nota negli ultimi sviluppi delle tecnologie per il monitoraggio climatico appena descritte è invece il graduale passaggio da una stima continua, ma puntuale ad una stima che si estende anche nello spazio.

2.3 Dati di pioggia mensili per la stazione pluviometrica di Allada

Definita quindi la fonte dei dati che si vanno ad elaborare ed esplicitato il significato del parametro principale al quale si fa riferimento per quantificare le precipitazioni, si procede con l'analisi degli stessi. La serie di partenza è quella dei dati di pioggia mensili registrati nella stazione di Allada, in Benin. Per far ciò, la serie in analisi è stata scomposta e si è cercato un approccio al dato da prospettive diverse, andando a ricercare delle chiavi di lettura appropriate. Per prima cosa si è andato ad effettuare un confronto tra la serie ottenuta dal database descritto e un'altra serie di dati mensili, relativi alla stessa stazione, fornita da *KNMI Climate Explorer* (<http://climexp.knmi.nl/>), un motore di ricerca per dati climatici sviluppato dal servizio

meteorologico olandese. Tale comparazione è servita come ulteriore prova della validità del dataset utilizzato e per scongiurare la presenza di errori accidentali dovuti alla trascrizione o ad un'errata lettura da parte del software. Poiché gli scarti tra i due database sono risultati molto piccoli, si è assunta la serie di partenza come affidabile e priva di errori grossolani. Come riportato in **Tabella 2** seguente, gli scarti sono nulli o al massimo dell'ordine di 10^{-6} per cui decisamente ininfluenti.

Anno	Mese	P_CRU [mm/mese]	P_KNMI [mm/mese]	confronto [mm/mese]
1922	1	3.0	3.0	0.00E+00
1922	2	26.0	26.0	0.00E+00
1922	3	25.0	25.0	0.00E+00
1922	4	73.0	73.0	0.00E+00
1922	5	107.0	107.0	0.00E+00
1922	6	250.0	250.0	0.00E+00
1922	7	2.0	2.0	0.00E+00
1922	8	0.0	0.0	0.00E+00
1922	9	83.0	83.0	0.00E+00
1922	10	292.5	292.5	0.00E+00
1922	11	173.5	173.5	0.00E+00
1922	12	13.0	13.0	0.00E+00
1923	1	0.0	0.0	0.00E+00
1923	2	-999.0	NaN	#VALORE!
1923	3	79.5	79.5	0.00E+00
1923	4	-999.0	NaN	#VALORE!
1923	5	96.2	96.2	3.05E-06
1923	6	85.3	85.3	-3.05E-06
1923	7	132.5	132.5	0.00E+00
1923	8	34.2	34.2	-7.63E-07
1923	9	53.5	53.5	0.00E+00
1923	10	184.7	184.7	3.05E-06
1923	11	41.3	41.3	7.63E-07
1923	12	0.0	0.0	0.00E+00
1993	1	-999.0	NaN	#VALORE!
1993	2	81.8	81.8	-3.05E-06
1993	3	89.9	89.9	-1.53E-06
1993	4	37.2	37.2	-7.63E-07
1993	5	181.3	181.3	-3.05E-06
1993	6	298.0	298.0	0.00E+00
1993	7	96.5	96.5	0.00E+00
1993	8	18.3	18.3	7.63E-07
1993	9	137.4	137.4	6.10E-06
1993	10	129.6	129.6	-6.10E-06
1993	11	96.0	96.0	0.00E+00
1993	12	61.1	61.1	1.53E-06

Tabella 2 Confronto tra il database CRU utilizzato per l'analisi ed un secondo database fornito da KNMI Climate Explorer

Per motivi di sintesi non è stata riportata la tabella completa. Si notano comunque alcuni valori evidenziati: essi sono i valori che nei due database a confronto non sono presenti e per i quali il database del CRU ci restituisce il valore “-999” mentre il database del KNMI restituisce la dicitura “NaN”. Essendoci quindi dei valori mancanti, per non minare la qualità del resto dei dati e per procedere con un'analisi quanto più accurata possibile, si sono eliminati gli anni incompleti, cioè si è ridotta la quantità di dati a disposizione per mantenere un certo standard qualitativo. La serie di partenza conterà su 60 anni di dati, andrà dunque dal gennaio del 1922 fino al dicembre del 1989, esclusi gli anni 1923, 1926, 1933, 1948, 1953, 1958, 1986, 1987. La serie completa è riportata in **Tabella 3**.

	1922	1924	1925	1927	1928	1929	1930	1931	1932	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944
gen	3.0	61.5	0.0	20.0	19.8	7.5	0.7	23.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	3.2	17.5	58.5	14.3
feb	26.0	69.3	64.0	56.0	14.0	42.1	2.4	34.6	29.6	0.0	7.6	57.5	59.0	75.0	66.5	50.5	8.5	30.3	7.3	7.0
mar	25.0	57.0	70.7	107.7	48.0	72.2	116.5	54.6	111.3	54.0	80.7	67.7	68.2	91.5	122.5	73.5	128.8	55.8	82.0	106.5
apr	73.0	259.7	109.0	96.2	116.0	111.7	77.8	65.6	156.4	104.5	101.6	43.1	46.5	128.5	169.5	69.0	66.2	146.8	150.6	28.8
mag	107.0	24.0	186.5	68.5	134.0	136.9	141.6	94.1	217.8	129.5	89.8	221.1	78.5	180.0	74.5	242.0	179.5	286.5	142.8	169.9
giu	250.0	121.0	261.0	88.5	155.3	323.3	173.3	213.0	245.7	228.0	273.0	108.1	88.0	109.0	314.0	495.5	168.0	114.5	319.9	187.5
lug	2.0	15.0	165.0	64.3	45.9	124.6	114.3	18.5	11.0	61.0	87.0	28.0	115.0	12.5	251.5	99.0	103.5	13.0	64.1	56.9
ago	0.0	48.5	20.0	0.0	44.0	24.9	16.1	50.1	13.5	71.0	40.3	20.0	3.5	23.5	75.0	28.0	14.5	2.0	10.2	15.0
set	83.0	114.5	118.0	104.3	146.5	77.4	9.7	223.9	9.0	177.7	73.1	91.0	70.0	71.0	25.0	73.0	311.4	207.3	47.9	22.2
ott	292.5	223.0	21.0	146.5	54.5	112.3	191.1	40.7	91.0	129.9	152.7	149.1	179.0	228.0	39.0	160.0	76.3	203.0	233.5	57.0
nov	173.5	45.0	41.0	71.0	19.5	105.9	49.7	19.4	94.6	54.3	56.4	73.0	90.5	109.0	170.0	63.7	57.9	23.7	65.1	43.1
dic	13.0	40.0	63.0	39.5	28.0	48.2	9.0	3.5	21.0	10.4	1.1	16.0	22.0	73.5	29.5	0.0	17.7	36.3	28.7	0.0
	1945	1946	1947	1949	1950	1951	1952	1954	1955	1956	1957	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
gen	0.0	0.0	9.2	0.0	38.4	10.0	7.0	6.0	20.3	2.6	8.3	0.0	3.9	21.7	0.0	31.0	0.0	4.0	37.1	1.2
feb	7.4	46.0	57.6	10.9	21.6	24.5	92.0	20.2	65.7	24.0	0.0	15.2	22.5	0.0	0.0	10.9	2.3	43.3	0.0	0.0
mar	21.3	66.9	90.4	119.7	89.5	70.7	101.0	162.2	162.3	157.3	125.7	179.7	59.2	42.5	100.2	48.1	130.3	65.5	171.4	179.3
apr	100.8	118.8	56.9	60.7	97.7	168.1	78.0	80.5	91.0	145.2	99.5	113.2	149.0	36.7	91.5	163.9	161.9	175.5	149.5	169.6
mag	85.3	177.9	124.2	324.2	138.5	124.3	172.0	111.8	167.6	123.2	196.4	306.6	246.5	122.7	190.4	164.2	232.8	110.9	280.4	137.4
giu	85.7	37.8	117.9	117.0	161.9	349.6	236.8	237.0	162.2	138.5	157.3	186.9	328.4	380.8	383.7	90.2	362.8	290.2	277.4	230.8
lug	140.0	1.1	164.6	208.4	128.9	313.1	56.9	0.0	85.8	10.9	163.0	86.5	28.5	30.5	149.2	218.3	145.9	109.4	155.6	68.6
ago	16.0	0.0	243.5	79.6	20.0	57.3	0.0	10.3	42.6	0.0	86.9	15.0	42.3	0.0	133.3	256.5	9.3	66.9	7.8	8.5
set	154.0	69.8	224.4	144.3	24.7	34.9	257.8	60.7	103.2	32.5	60.4	78.9	187.4	62.8	18.7	154.7	59.5	102.6	63.0	49.3
ott	243.0	137.7	197.9	126.8	143.3	209.0	258.0	147.4	230.6	342.0	171.4	158.3	245.9	149.5	114.8	206.2	85.0	115.6	84.0	100.3
nov	37.0	45.7	16.6	75.5	56.4	81.9	40.0	39.8	53.8	115.8	152.8	191.5	22.2	49.1	128.2	129.4	18.8	23.9	24.8	41.0
dic	2.0	4.2	27.3	2.3	4.3	0.0	26.0	10.1	0.0	67.2	45.2	61.5	14.0	0.0	25.6	0.0	46.2	18.2	1.3	18.3
	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1988	1989
gen	0.0	0.0	16.4	49.5	34.2	0.0	11.5	0.0	0.0	40.3	31.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8
feb	25.1	20.0	41.8	47.3	64.6	28.2	13.0	48.6	28.0	8.1	141.4	71.7	98.9	0.0	75.0	0.0	0.0	3.0	34.0	4.6
mar	138.6	37.7	65.7	81.1	163.3	49.0	133.3	24.7	156.7	6.5	35.3	59.6	29.5	45.2	108.6	13.0	82.0	8.2	103.2	161.9
apr	73.7	66.5	141.0	69.1	162.9	50.3	103.0	131.6	68.1	70.9	195.3	78.6	71.9	52.2	88.2	61.0	66.5	82.9	95.3	65.3
mag	99.6	146.4	206.0	134.8	95.1	51.0	117.4	31.8	52.7	115.1	139.2	249.1	30.5	169.5	67.2	85.0	190.9	81.4	131.5	134.5
giu	209.2	159.1	146.7	56.1	268.2	157.0	195.2	222.1	129.7	159.0	120.6	198.0	64.0	187.6	309.4	142.0	59.3	111.4	180.0	208.5
lug	407.6	74.7	30.5	121.9	12.7	12.0	186.7	237.2	0.0	23.0	22.7	185.0	43.2	60.5	65.0	57.0	23.7	104.2	31.4	102.3
ago	344.6	25.6	2.3	16.3	57.2	68.5	27.0	0.0	0.0	6.0	4.0	74.7	188.0	74.5	0.0	26.7	70.2	0.0	3.5	120.0
set	237.9	51.2	87.2	110.6	86.7	146.6	142.2	5.6	6.0	76.8	35.0	62.8	273.5	144.9	0.0	92.4	159.1	101.1	157.9	87.1
ott	271.1	140.0	187.6	54.2	46.8	101.2	198.5	82.0	149.2	114.4	94.6	113.0	97.9	96.2	65.0	53.7	158.8	190.3	255.5	130.8
nov	70.0	105.0	101.3	18.5	0.0	33.5	48.4	174.6	38.4	24.4	68.0	16.4	108.0	16.5	135.0	45.0	0.0	80.1	6.2	10.6
dic	0.0	0.0	0.0	13.2	9.8	5.0	0.0	73.1	0.0	16.0	7.0	0.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	0.0

Tabella 3 Dati di precipitazione mensili espressi in mm/mese

A questo punto si è cominciato ad approfondire l'analisi partendo dalla suddivisione dei dati per anno e andando a rappresentare le altezze di pioggia mensili. Si sono ottenuti quindi 60 istogrammi, uno per ogni anno, che evidenziano una certa coerenza dell'andamento pluviometrico. Per il momento non è importante andare a valutare il quantitativo di pioggia caduta, ma piuttosto soffermarsi sulla tendenza in modo tale da ricavare considerazioni rilevanti. In **Figura 22**, **Figura 23** e **Figura 24** vengono riportati i grafici risultanti.



Figura 22 Istogrammi relativi all'andamento delle precipitazioni mensili negli anni che vanno dal 1922 al 1949



Figura 23 Istogrammi relativi all'andamento delle precipitazioni mensili negli anni che vanno dal 1950 al 1975

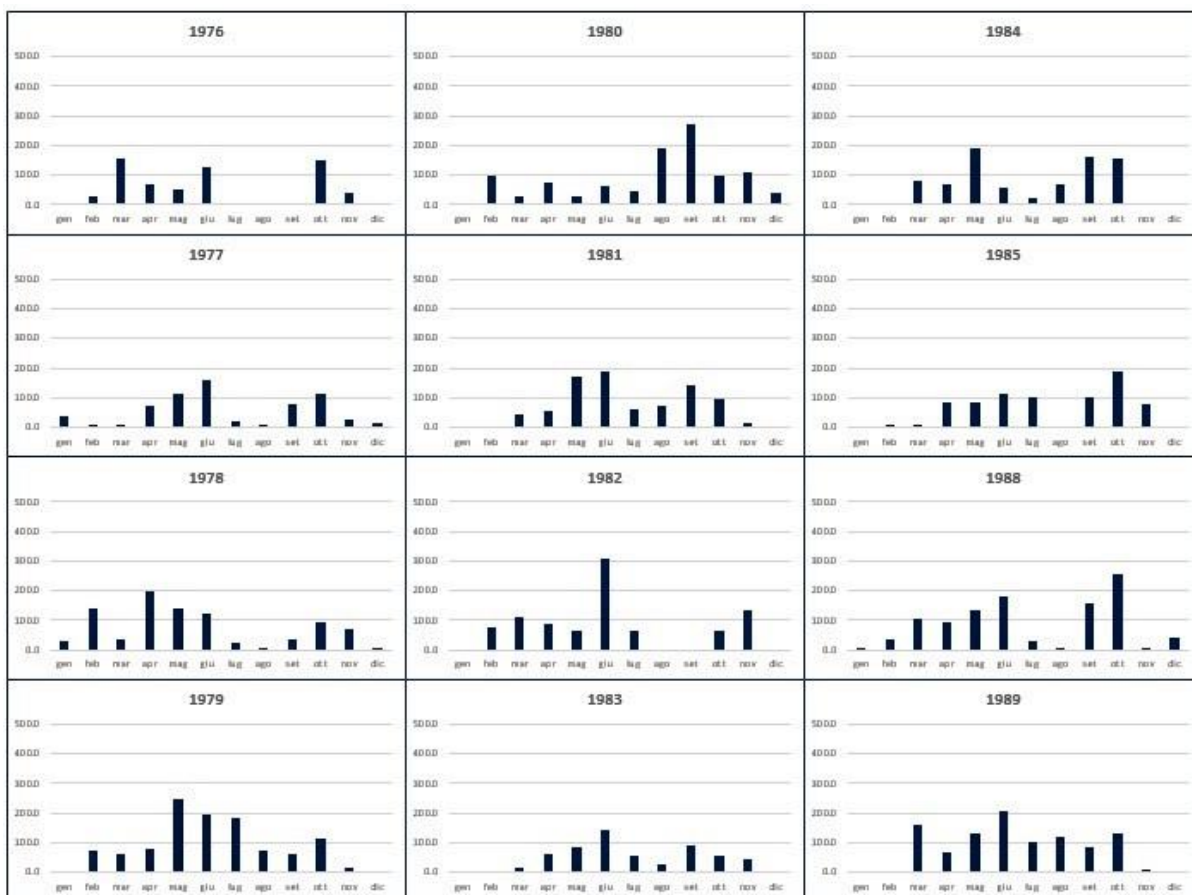


Figura 24 Istogrammi relativi all'andamento delle precipitazioni mensili negli anni che vanno dal 1976 al 1989

Risulta ben definito l'andamento delle piogge nei dintorni di Allada: al netto del valore dell'intensità di pioggia che può essere minore o maggiore da un anno all'altro, si può apprezzare una certa sistematicità che altro non è che l'alternanza delle stagioni al trascorrere dei dodici mesi. Si parla, in maniera più appropriata, di stagionalità. Questi risultati vanno a confermare quello che è stato descritto precedentemente in via teorica, rifacendosi alla letteratura presente in tema di climatologia del sud del Benin: le stagioni piovose sono due, la più lunga e, generalmente, più intensa va da marzo a luglio mentre la più corta si ha nei mesi autunnali, specialmente in ottobre, con manifestazioni frequenti anche a settembre e, in minor parte, a novembre. L'aumento dell'altezza di pioggia di mese in mese è graduale fino a raggiungere un picco tra maggio e giugno, leggermente meno graduale è invece la sua diminuzione che porta a due brevi stagioni siccitose: la prima può essere considerata quella invernale che copre i mesi di dicembre, gennaio e febbraio mentre la seconda è quella che si ha ad agosto e che talvolta coinvolge anche le ultime settimane di luglio o le prime settimane di settembre. È chiaro che queste sono riflessioni generiche che possono essere considerate vere in assoluto solo se ci si riferisce all'anno medio. L'anno medio è un anno puramente teorico in quanto non appartenente alla serie di studio, ma è generato sinteticamente andando a mediare i

valori di altezza di pioggia dello stesso mese per ogni anno e sintetizzando le medie ottenute (**Tabella 4**) all'interno di un istogramma (**Figura 25**).

MESE	P [mm/mese]
GENNAIO	10.3
FEBBRAIO	32.1
MARZO	87.3
APRILE	103.7
MAGGIO	146.2
GIUGNO	197.5
LUGLIO	92.0
AGOSTO	45.4
SETTEMBRE	101.1
OTTOBRE	147.5
NOVEMBRE	64.5
DICEMBRE	18.0

Tabella 4 Precipitazioni mensili dell'anno medio

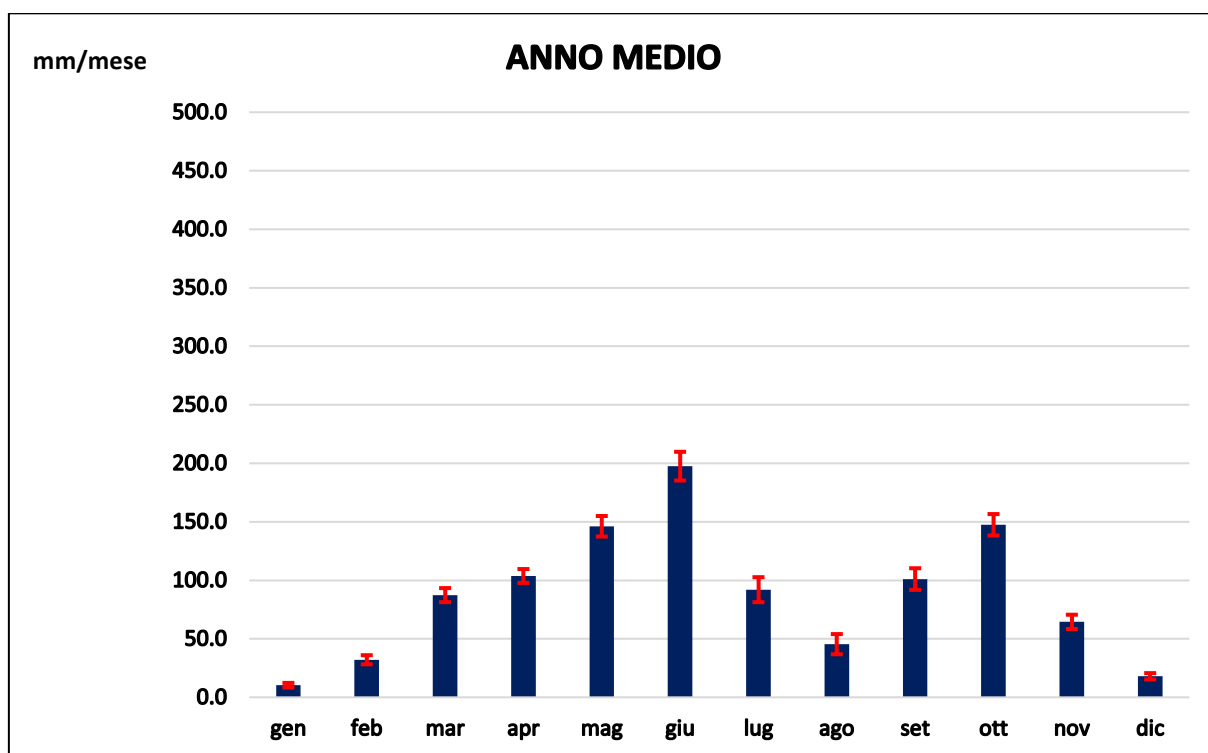


Figura 25 Istogramma delle precipitazioni mensili dell'anno medio

Il grafico ottenuto è perfettamente coerente con quanto si può trovare in letteratura relativamente alle precipitazioni medie mensili. Nell'articolo *Les Ressources en eaux superficielles de la République du Bénin* (Le Barbé et al., 1993) vi è uno studio che copre il

periodo dal 1925 al 1984 che, per la zona sud del paese (*zone 1*), mostra degli andamenti molto simili a quelli riportati in **Figura 26**.

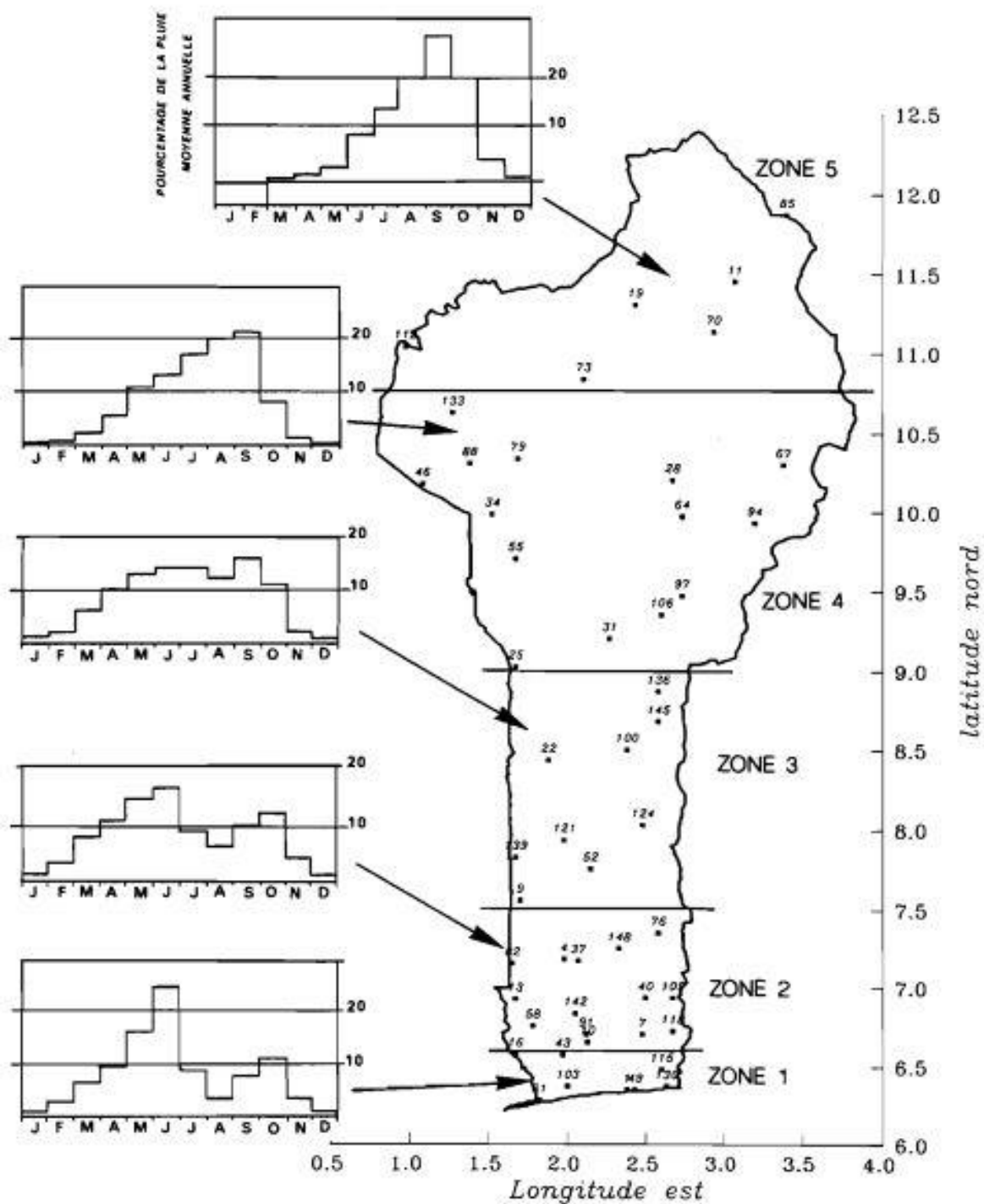


Figura 26 Schemi delle precipitazioni medie mensili nel periodo 1925-1984 divisi per zone (Le Barbé et al., 1993)

Il medesimo articolo poi mostra anche la precipitazione mensile lungo la latitudine misurata come percentuale della pioggia media annuale in tutta l'area (**Figura 27**).

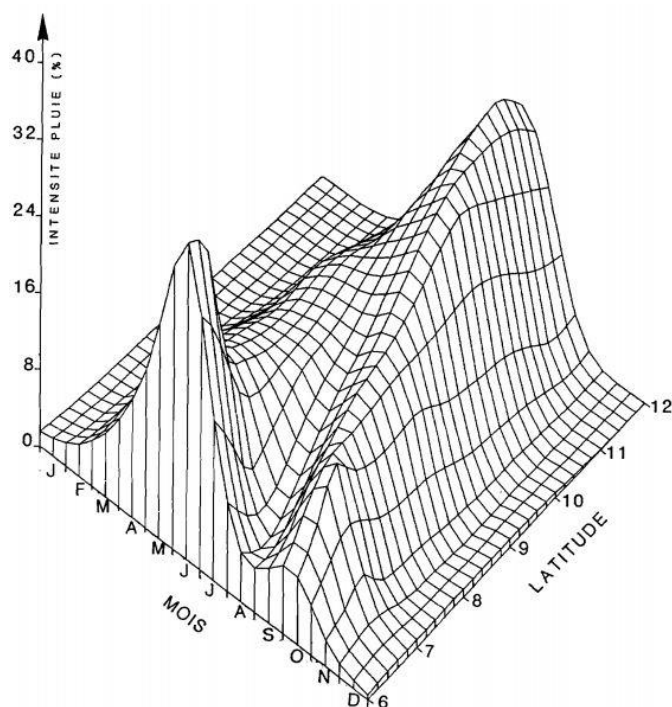


Figura 27 Grafico in tre dimensioni: mese, latitudine e percentuale di precipitazione sul totale (Le Barbé et al., 1993)

Se si sposta poi l'attenzione sui grafici di **Figura 22**, **Figura 23** e **Figura 24** si potranno notare delle eccezioni, ovvero dei valori o degli andamenti che si discostano, talvolta anche in modo significativo, dal grafico relativo all'anno medio. Si possono elencare diversi esempi: il mese di aprile del 1924, così come il mese di maggio del 1949, è stato molto più piovoso del mese di giugno e ciò ha determinato un aumento intermittente delle precipitazioni, mentre nel 1930 e nel 1989 la peculiarità è legata alla presenza di una stagione seccitosa invernale particolarmente accentuata, con mesi in cui l'altezza di pioggia registrata è stata pari a zero. Nel 1932 e nel 1968 il trend delle precipitazioni è stato molto distante da quello medio e, in assenza di altri dati, si sarebbe addirittura potuto asserire che le stagioni in alternanza fossero due, una piovosa e una seccitosa (nella fattispecie, nel 1932 si è avuta la prima metà dell'anno molto piovosa e la seconda metà dell'anno molto secca, viceversa è avvenuto nel 1968); anche l'anno 1937 avrebbe potuto indurre in errore, infatti quello che si vede è un andamento più o meno costante delle precipitazioni. Altre discrepanze rispetto ai valori attesi delle altezze di pioggia mensili si sono verificati nel 1963 e nel 1980, in cui è stata segnalata un picco di piovosità in agosto e nel 1978 in cui, a dispetto di quanto visto, il mese più piovoso è stato febbraio.

Detto ciò, vi sono comunque molti anni che trovano perfetta aderenza con l'anno medio; in particolare, calcolando le diverse deviazioni standard (approfondimento nel seguito) sugli anni di studio, si è risaliti all'anno che più si discosta dall'anno medio, non a caso il già citato 1968, e l'anno che invece più si avvicina, il 1950 (**Figura 28**).

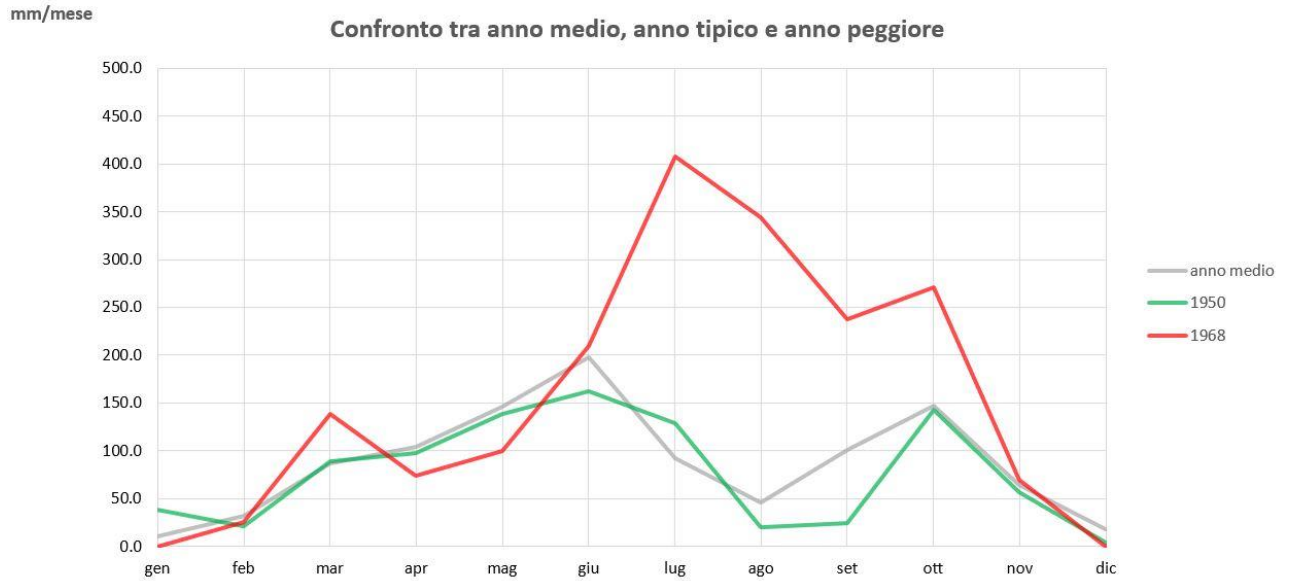


Figura 28 Grafico a linee in cui si evidenziano le differenze tra gli andamenti di anno medio, anno tipico (1950) e anno peggiore (1968)

Tornando al grafico dell'anno medio, si possono poi apprezzare delle barre di errore colorate in rosso. Esse stanno ad indicare la variabilità dei valori, ovvero la loro dispersione intorno al valor medio. Quanto più i dati dello stesso mese sono concentrati intorno alla media, tanto più piccola sarà la barra di errore; se, viceversa, il dato non è stabile, ma presenta delle fluttuazioni significative, allora si avrà una barra di errore maggiore. Le barre di errore mostrate si ottengono a partire da un indice di dispersione: la deviazione standard (o scarto quadratico medio), definita come segue:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N - 1}} \quad (9)$$

La deviazione standard σ così trovata è stata calcolata per ogni mese ($j=\text{gen, feb...dic}$). Si è indicato con N il numero degli anni ($N=60$), con x il valore di altezza di pioggia del mese j e con μ il valore medio dello stesso mese stimato sui 60 anni di dati. La formula enunciata sopra però è una variante della deviazione standard strettamente intesa; infatti al denominatore ci sarebbe dovuto essere solo N , ma spesso si utilizza la correzione col -1 perché, come in questo caso, il valore medio non è noto a priori bensì è stimato. In **Tabella 5** sono riportati i valori di media e deviazione standard per ogni mese.

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
μ [mm/mese]	10.3	32.1	87.3	103.7	146.2	197.5	92.0	45.4	101.1	147.5	64.5	18.0
σ [mm/mese]	15.7	30.2	46.6	45.9	68.1	95.1	82.9	66.8	71.6	70.8	47.2	20.9
massimo [mm/mese]	61.5	141.4	179.7	259.7	324.2	495.5	407.6	344.6	311.4	342.0	191.5	73.5
minimo [mm/mese]	0.0	0.0	6.5	28.8	24.0	37.8	0.0	0.0	0.0	21.0	0.0	0.0

Tabella 5 Medie, valori estremi e deviazioni standard su scala mensile dei valori di precipitazione relative agli anni 1922-1989

Per completezza, in **Tabella 5** sono stati riportati anche i valori massimi e minimi per ogni mese nei 60 anni; anche questa può essere vista come una chiave di lettura per capire la stagionalità delle piogge, coerentemente con quanto già detto.

Si nota che la deviazione standard è dello stesso ordine di grandezza della media; addirittura nel caso di gennaio, agosto e dicembre è maggiore delle rispettive medie. Ciò porta a delle riflessioni riguardanti l'indice di dispersione utilizzato che appare consistente, ma distorto.

Calcolando la deviazione standard si va a valutare l'oscillazione intorno al valore medio annuale di precipitazione: a causa di questo, per quelli che possono essere considerati i mesi più estremi, ovvero che più si distanziano dal valore medio annuale, l'utilizzo della deviazione standard come indice di dispersione ha poco senso.

Alla luce di quanto detto sulla poca rappresentatività della deviazione standard, per valutare i limiti fiduciali all'interno dei quali si muove la misura e per rappresentarli tramite le barre di errore, si è utilizzato l'errore standard (**Tabella 6**). Quest'ultimo, usato per valutare l'oscillazione intorno alla media del singolo mese, è in pratica una deviazione standard normalizzata rispetto al mese, a patto che i dati (in questo caso gli anni per ogni mese) siano uguali in numero. L'errore standard è calcolato come segue:

$$ES = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (10)$$

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
μ [mm/mese]	10.3	32.1	87.3	103.7	146.2	197.5	92.0	45.4	101.1	147.5	64.5	18.0
σ [mm/mese]	15.7	30.2	46.6	45.9	68.1	95.1	82.9	66.8	71.6	70.8	47.2	20.9
ES [mm/mese]	2.0	3.9	6.0	5.9	8.8	12.3	10.7	8.6	9.2	9.1	6.1	2.7

Tabella 6 Valori di errore standard su scala mensile dei valori di precipitazione relative agli anni 1922-1989

Il dato poi è stato analizzato anche in un'ottica differente, andando ad evidenziare la frequenza con la quale il j-esimo mese è risultato il più siccitoso (**Figura 29**) o il più piovoso (**Figura 30**).

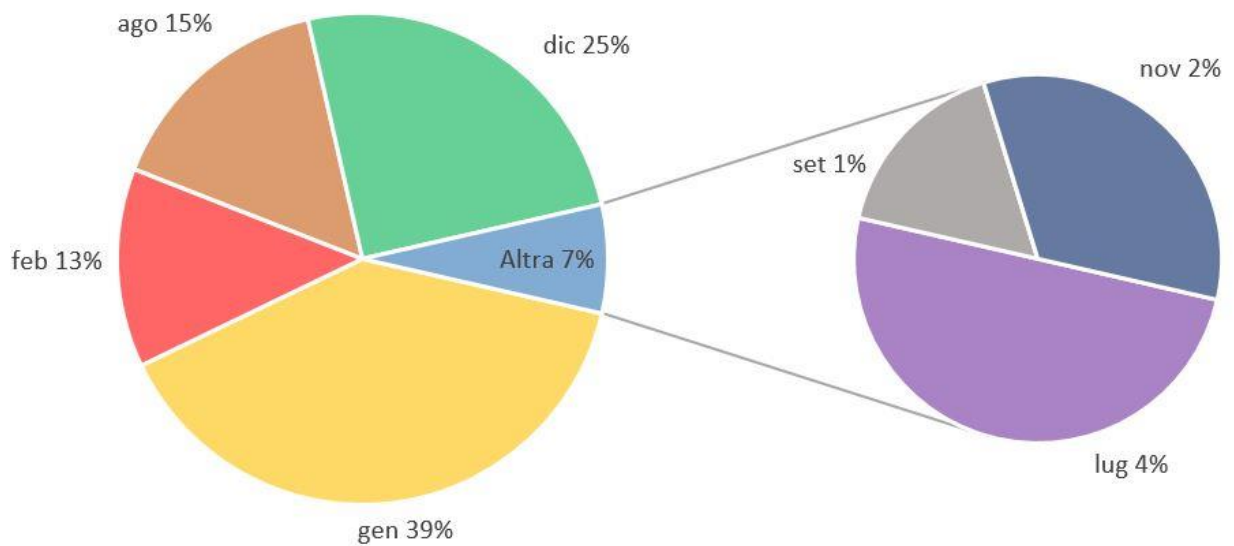


Figura 29 Distribuzione del mese più secco dell'anno negli anni 1922-1989

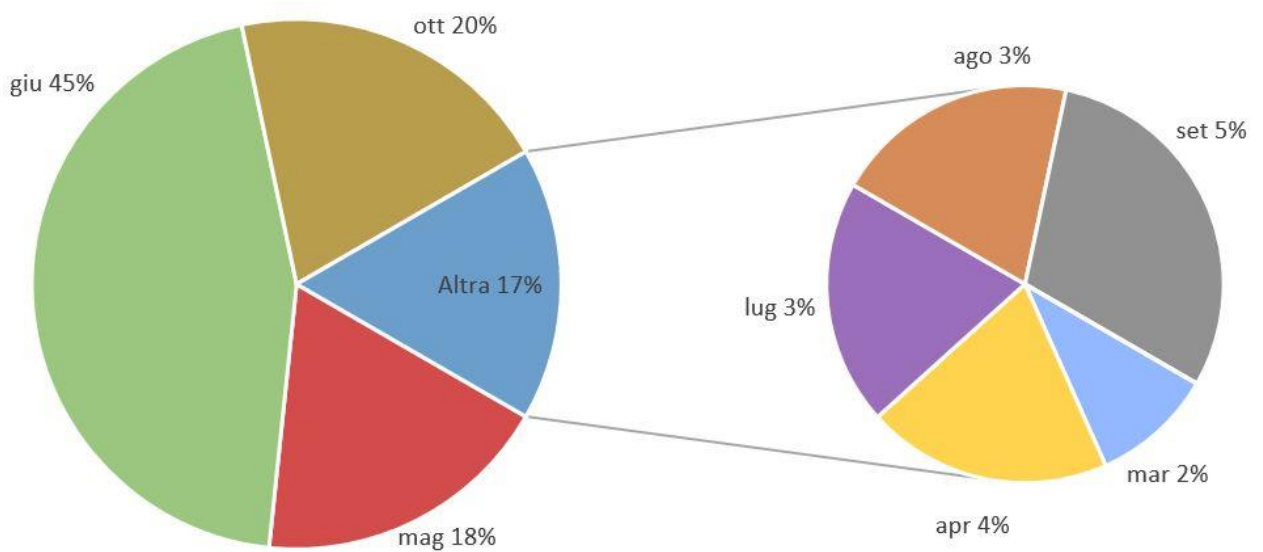


Figura 30 Distribuzione del mese più piovoso dell'anno negli anni 1922-1989

Quello che salta all'occhio dai due grafici a torta è una certa analogia nella distribuzione dei mesi migliori, siano essi per piovosità o per aridità. Per il mese più secco vi è una chiara preponderanza di gennaio, ma sono presenti comunque alternative ben rappresentate come dicembre, agosto e febbraio e la stessa cosa si può notare anche nel secondo grafico in cui giugno si è manifestato come mese più piovoso quasi la metà delle volte anche se contrastato da una buona rappresentanza per quanto riguarda ottobre e maggio. Le differenze invece sono legate alla variabilità dei mesi meno frequenti, nel senso che se per il mese più secco si hanno

solo tre casi in cui i valori sono al di sotto del 10%, peraltro raggiungendo sommati solo il 7%, nel caso del mese più piovoso i valori al di sotto del 10% risultano essere ben sei, con una rappresentanza totale del 17%. I mesi che compaiono nei due grafici sono quasi complementari, si nota sovrapposizione solo per i mesi di luglio, agosto e settembre.

Nel calcolo delle percentuali si è andato a valutare il numero delle volte in cui i massimi e i minimi ricadono nel j-esimo mese; se il numero dei massimi elaborati è stato pari al numero degli anni, quindi 60, stessa cosa non è avvenuta coi minimi perché talvolta il minimo assoluto, cioè zero, è stato raggiunto da più mesi nello stesso anno. In questa circostanza, si sono conteggiati tutti i mesi dell'anno che hanno raggiunto tale minimo.

A questo punto si scende maggiormente nel dettaglio, cercando di esplicitare quello che è stato l'andamento dei massimi e dei minimi nel corso del periodo di 60 anni che si sta analizzando. Una panoramica iniziale in questa direzione la si può avere osservando l'andamento dei massimi e dei minimi e confrontandoli in un unico grafico (**Figura 31**). Da tale grafico si potrebbe dedurre che l'andamento dei massimi è più articolato rispetto a quello dei minimi: ciò è in parte vero per il semplice fatto che l'entità delle oscillazioni è maggiore nei massimi, ma in buona parte è dettato anche dalla scala comune utilizzata per la rappresentazione. Per rendere l'analisi più completa si propongono quindi due differenti grafici (**Figura 32**, **Figura 33**) che vanno a focalizzarsi sul singolo trend rispettivamente dei massimi e dei minimi. In **Figura 32** si nota un andamento dei massimi piuttosto irregolare, che vede il suo picco all'inizio degli anni '40 e il suo valore minimo all'inizio degli anni '70. Il valore medio (indicato nelle figure con una linea nera tratteggiata) intorno al quale oscillano i massimi è pari a 250.2 mm/mese; in rosso è indicata la linea di tendenza, la quale ha un coefficiente angolare pari a $-0.5879 \text{ anno}^{-1}$ che mostra chiaramente una decrescita dei massimi nel tempo. In **Figura 33** è evidente il limite inferiore dell'intervallo di valori in cui si sta lavorando, che può essere considerato $[0, +\infty]$. Inoltre, salta all'occhio che l'intensità di pioggia ha spesso raggiunto il minimo assoluto, nonostante un valore medio che si attesta su 1.6 mm/mese. Anche in questo caso la tendenza segna un decremento comunque inferiore rispetto al decremento visto per i valori massimi: il coefficiente angolare è $-0.0446 \text{ anno}^{-1}$.

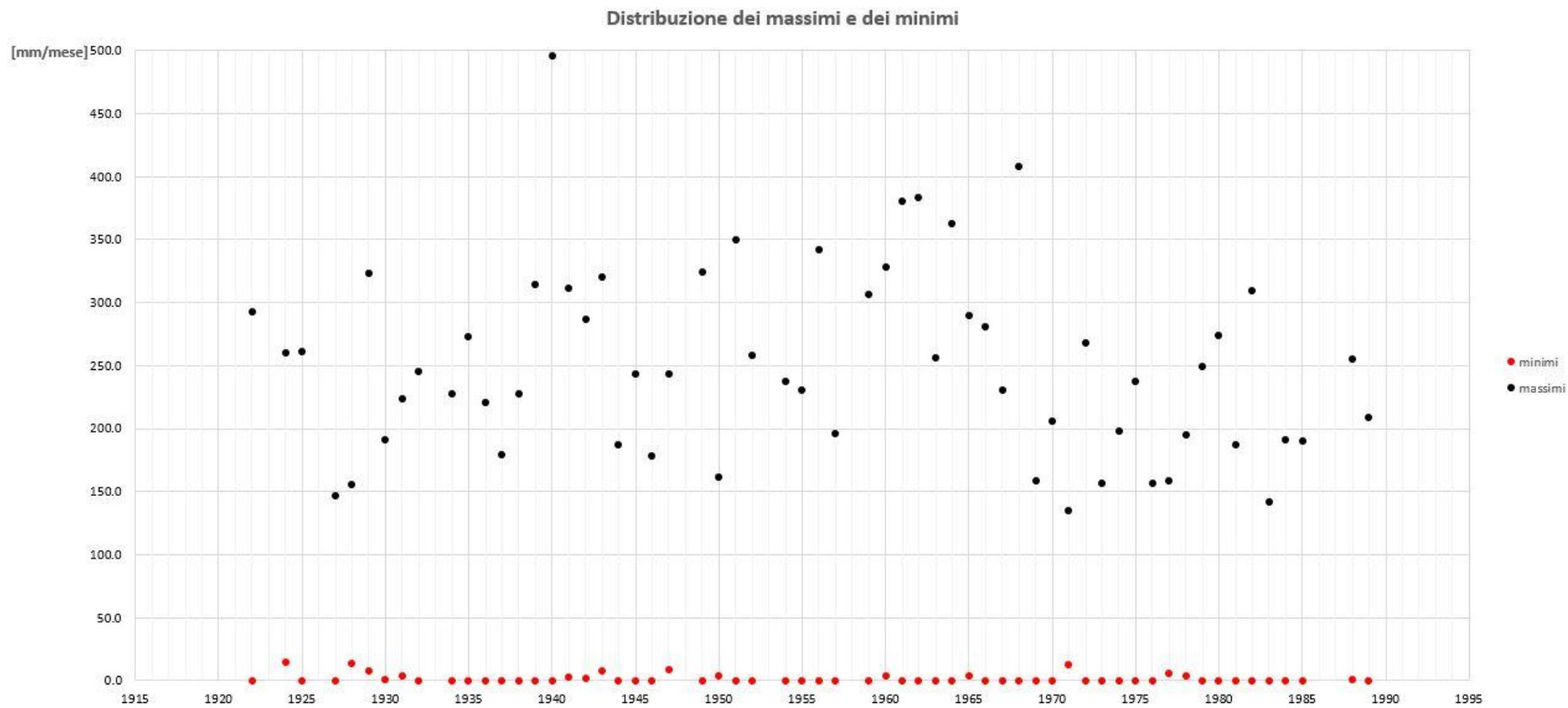


Figura 31 Distribuzione dei valori di precipitazione [mm/mese] massimi e minimi annuali mediante grafico a dispersione

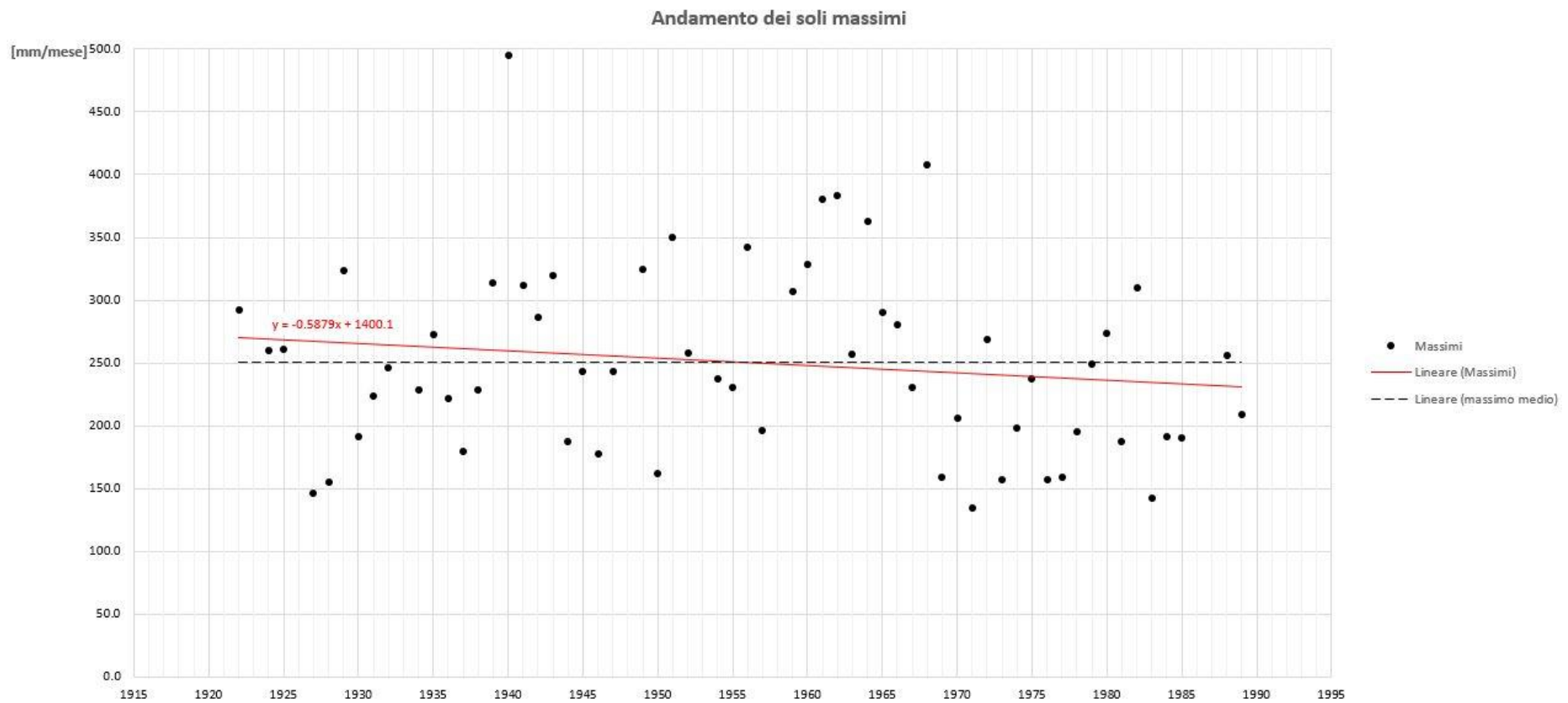


Figura 32 Distribuzione dei valori di precipitazione dei soli massimi mensili per ciascun anno mediante grafico a dispersione. La linea rossa identifica la retta di regressione lineare dei dati di massimo osservati, la linea nera tratteggiata indica il valore medio dei massimi rappresentati dai punti neri

Andamento dei soli minimi

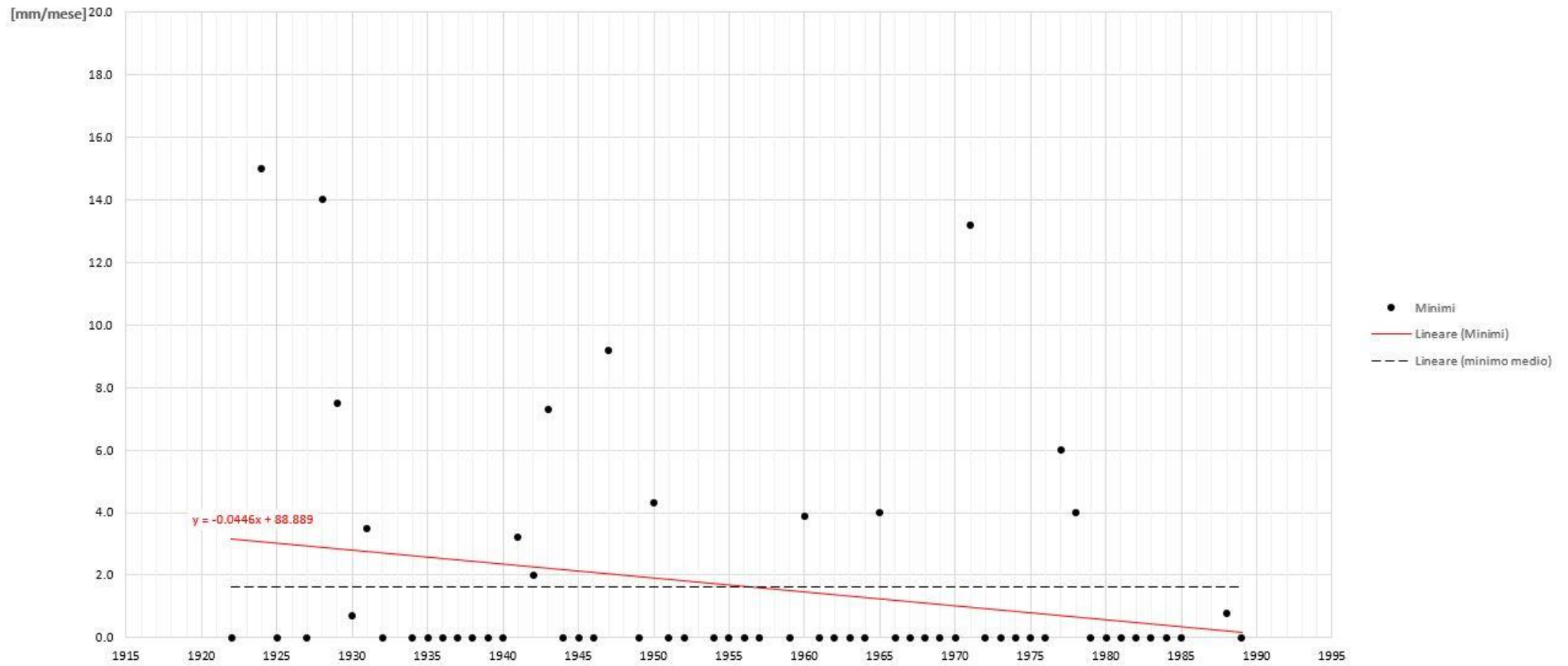


Figura 33 Distribuzione dei valori di precipitazione dei soli minimi mensili per ciascun anno mediante grafico a dispersione. La linea rossa identifica la retta di regressione lineare dei dati di minimo osservati, la linea nera tratteggiata indica il valore medio dei minimi rappresentati dai punti neri

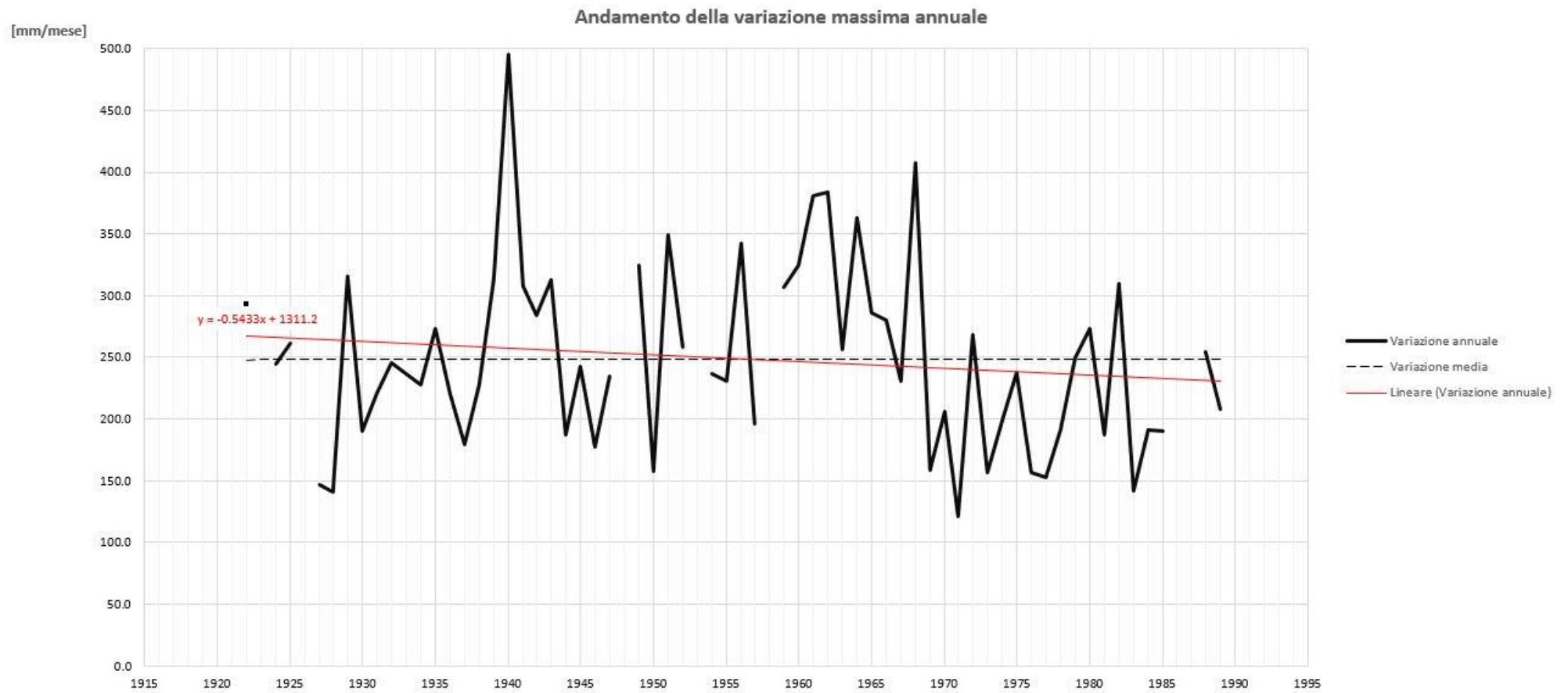


Figura 34 Andamento della variazione massima annuale mediante grafico a linee. La linea rossa identifica la retta di regressione lineare dei dati di variazione annua elaborati, la linea nera tratteggiata indica il valore medio di tale variazione

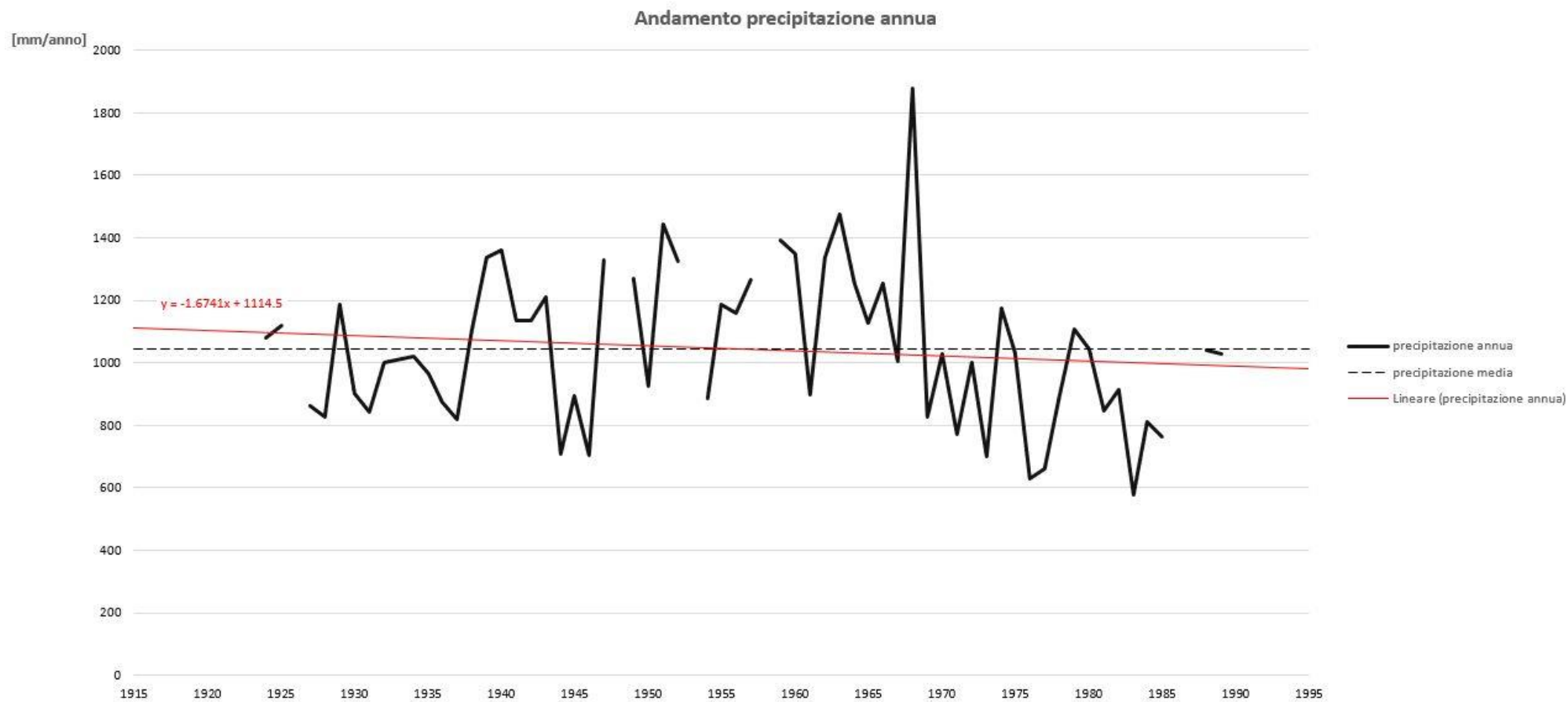


Figura 35 Andamento della precipitazione annua totale mediante grafico a linee. La linea rossa identifica la retta di regressione lineare dei dati di precipitazione annua osservati, la linea nera tratteggiata indica il valore medio di precipitazione annua

Non sempre un massimo alto è associato ad un minimo alto, ma, al contrario, la variazione massima anno per anno (data dalla differenza tra la precipitazione mensile massima e minima all'interno di un singolo anno) ha una sua mutabilità (**Figura 34**). Da quanto detto sui minimi, ovvero che spesso il loro valore è pari a zero, consegue logicamente che il grafico relativo alla variazione sia quasi perfettamente sovrapponibile a quello dei massimi; gli unici tratti in cui non si ha sovrapposizione è laddove il minimo annuale è molto maggiore di zero. La linea di tendenza negativa, la cui pendenza risulta essere pari a 28.5° , è determinata più dai massimi che si stanno riducendo che dai minimi che sono già molto bassi e il valore medio della variazione è pari a 248.6 mm/mese.

Infine, l'ultimo riferimento necessario per avere il quadro completo dell'andamento delle piogge negli anni che vanno dal 1922 al 1989 è quello delle precipitazioni annuali (**Figura 35**). Anche l'andamento delle precipitazioni annuali appare discontinuo, il massimo si è toccato con i 1877.4 mm/anno registrati nel 1968, il minimo lo si è avuto nel 1983 quando ci furono solo 575.8 mm di pioggia in un anno mentre la precipitazione annuale media, ovviamente uguale alla precipitazione totale dell'anno medio, è pari a 1045.6 mm/anno. La linea di tendenza è decrescente, con un valore di pendenza pari a 59.1° , e ciò è solo la conferma di quanto si poteva dedurre valutando i trend nei grafici precedenti.

Per concludere, la stazione pluviometrica di Allada ha registrato una graduale riduzione dell'apporto meteorico dovuta principalmente al calo di intensità nella stagione delle piogge. I motivi per i quali la situazione sta evolvendo in questo senso sono molteplici e di alto interesse scientifico, ma esulano dallo scopo del presente elaborato.

CAPITOLO 3 – Destinazione della risorsa

Fino ad ora si è cercato di fornire una panoramica complessiva sia dell'area di intervento a livello nazionale che del regime pluviometrico a livello locale, con riferimento alla stazione della città di Allada. Nel presente capitolo, dopo un'introduzione descrittiva dell'agricoltura del Benin, si cercherà di sfruttare concretamente il lavoro di ricerca e di elaborazione dei dati fatto in precedenza, andando a calcolare la richiesta idrica per differenti scenari colturali. L'obiettivo del presente elaborato di tesi è quello di valutare il fabbisogno idrico di natura civile richiesto da 75 utenti dell'orfanotrofio, il fabbisogno idrico di natura irrigua relativo ad un primo campo coltivato di 0.025 ettari (250 m²) e ad una seconda piantagione di 13 ettari. Per quanto riguarda la richiesta idrica ad uso personale e domestico da parte degli utenti, si partirà considerando 45 l/ab/g, in linea con quanto suggerito dall'Organizzazione delle Nazioni Unite, la quale stabilisce in 50 l/ab/g il quantitativo minimo di acqua a cui ognuno dovrebbe aver accesso per diritto. Tale valore minimo è comprensivo dell'acqua da bere che, in questa trattazione, viene esclusa. Per quanto riguarda l'uso irriguo, nelle pagine seguenti si riporta un approfondimento in quanto la richiesta idrica varia a seconda del tipo di coltura.

3.1 Uso irriguo

Si definisce irrigazione quella quantità di *“acqua, confinata nel tempo e nello spazio, apportata artificialmente ad un suolo. Essa permette di soddisfare il fabbisogno idrico di una coltura in un dato momento del suo ciclo vegetativo o porta il terreno al livello di umidità desiderato al di fuori del ciclo vegetativo [...]”* (FAO Glossary, 2006).

I dati statistici che spesso vengono usati per studiare la richiesta d'acqua per l'uso irriguo sono molto rari e piuttosto generici, per questo gli studi esistenti nel settore sono abbastanza sommari e tendono ad essere approssimativi sia a livello spaziale, trascurando quelle che sono le peculiarità regionali e le caratteristiche locali, che a livello temporale, non considerando le differenze sostanziali che esistono tra le stagioni piovose e le stagioni siccitose. In Benin esiste un problema legato all'acqua, ma questo non consiste nel quantitativo d'acqua in sé, ma nella sua distribuzione durante l'anno. Da un diverso punto di vista si potrebbe dire che la criticità è legata all'accessibilità e non alla disponibilità ed è per questo che la gestione della risorsa idrica riveste un ruolo fondamentale per lo sviluppo del settore agricolo. Ad essa andrebbero sommati

altri tipi di intervento, ad esempio nel campo della tecnologia, volti a fornire agli agricoltori utensili e macchine migliori e anche a livello politico, con l'istituzione di una struttura gestionale chiara e definitiva per quanto riguarda l'amministrazione della risorsa. Vi sono poi delle altre problematiche che concorrono a questa situazione emergenziale; esse sono da ricercare nei dati esposti nel capitolo precedente, dove risulta chiara una certa instabilità climatica con gli apporti meteorici che non si assestano attorno ad un certo valore con regolarità, ma, anzi, prediligono un andamento piuttosto casuale, nei limiti delle caratteristiche meteorologiche descritte. Ciò è allarmante se si pensa che circa il 65% della popolazione beninese lavora nel settore agricolo e che da questo settore proviene tra il 70% e l'80% dell'export totale. I prodotti più esportati sono il cotone, gli anacardi e l'olio di palma, mentre le coltivazioni più comuni sono quelle di cereali, come mais e saggina, dei legumi, come fagioli e arachidi e dei tuberi, come patate e manioca (FAO, 2005). L'infrastruttura irrigua utilizzata in Benin ha tre diversi livelli: il primo è il livello urbano e periurbano e consente l'irrigazione delle coltivazioni di ortaggi vicino alle grandi città, il secondo avviene su piccola scala e riguarda le valli interne, mentre il terzo livello è su grande scala e serve soprattutto le grandi coltivazioni di riso, canna da zucchero e olio di palma. Nonostante l'irrigazione a livello urbano e periurbano sia tipica del sud del paese, l'area di interesse per questo lavoro non è servita da nessun tipo di infrastruttura e per questo si rendono necessari dei serbatoi di raccolta dell'acqua. Il fatto che quest'area non sia servita da infrastrutture irrigue non è un caso: come riportato in **Tabella 7**, un'indagine (FAO, 2005) ha dimostrato che solo lo 0.23% della superficie agricola viene irrigata, sfruttando pertanto una piccola percentuale della superficie che si potrebbe potenzialmente irrigare stimata in 322000 ettari, ovvero oltre 3000 km², distribuiti tra valli (117000 ettari) e pianure (205000 ettari).

Potenziale di irrigazione				
1	Irrigazione, controllo totale/parziale: area ben servita	2002	10973	ha
	i. di superficie	2002	5043	ha
	i. a spruzzo	2002	4570	ha
	i. localizzata	2002	1360	ha
	porzione irrigata con acque sotterranee	2002	20	%
	porzione irrigata con acque di superficie	2002	80	%
2	Aree poco servite	2002	1285	ha
	Superficie totale servita	2002	12258	ha
	% della superficie coltivata	2002	0.5	%
	aumento mensile annuo	1994-2002	2.3	%
	porzione dell'area servita realmente irrigata	2002	23	%
3	Paludi e bassipiani coltivati non serviti	1994	6988	ha
	Superficie totale con controllo d'acqua	2002	19246	ha
	% della superficie coltivata	2002	0.7	%
Superfici a controllo totale/parziale				
	superfici <50 ha	2002	1723	ha
	superfici comprese tra 50 ha e 100 ha	2002	1328	ha
	superfici >100 ha	2002	7922	ha

Tabella 7 Panoramica dell'irrigazione del Benin (AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005)

La **Tabella 7** parla di 10973 ettari di territorio ben serviti da infrastrutture irrigue. Questa superficie è formata in buona parte da aree superiori ai 100 ettari (**Figura 36**).

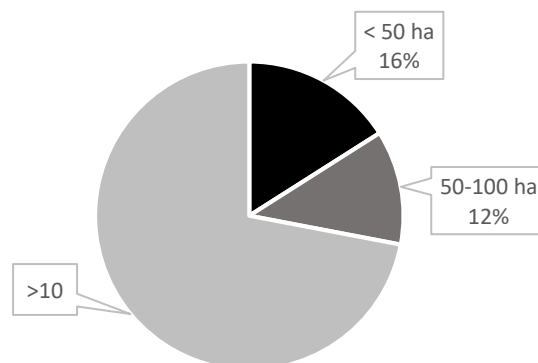


Figura 36 Percentuale di aree ben servite su campi piccoli, medi e grandi (AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005)

Per quanto riguarda la distribuzione dell'infrastruttura irrigua nei vari dipartimenti si fa riferimento alla **Tabella 8**.

Dipartimento	Controllo totale dell'acqua		Controllo parziale dell'acqua	Irrigazione totale
	Superficie teorica	Superficie effettiva		
Atacora-Donga	322	89	497	908
Borgou-Alibori	751	607	257	1615
Atlantique-Littoral	1200	128	0	1328
Mono-Couffo	257	114	103	474
Oueme-Plateau	1200	635	27	1862
Zou-Colline	5619	51	401	6071
TOTAL	9349	1624	1285	12258

Tabella 8 Valori espressi in ettari delle superfici in cui l'apporto idrico è controllato e fornito da infrastrutture (AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005)

Si nota uno sbilanciamento alquanto accentuato tra i dipartimenti del centro del paese (Zou-Colline) e i restanti, con il complesso comprendente i dipartimenti di Mono e Couffo ultimo per estensione della rete di irrigazione. La **Tabella 8** distingue poi gli impianti che controllano totalmente il flusso idrico da quelli che lo controllano solo parzialmente; a questo proposito è da sottolineare come la maggior parte dei territori prediliga, per scelta o per circostanze, un controllo completo sull'irrigazione con la sola eccezione dei dipartimenti Atacora e Donga per i quali invece gli ettari in controllo totale sono paragonabili agli ettari in controllo parziale. Nonostante questo, a partire dagli anni '90 si è avuto un lieve sviluppo degli impianti a controllo parziale permesso dalla miglior conoscenza della zona: come mostra la **Tabella 9**, si è registrato un incremento di 835 ettari, di cui oltre 300 ettari dovuti ad iniziative private. Per quanto

riguarda invece i terreni a controllo totale, non si è avuta una vera e propria estensione dell'area interessata, ma invece sono stati apportati alcuni miglioramenti ai perimetri già esistenti. Inoltre, è necessario specificare che i dati seguenti provengono da indagini precedenti allo sviluppo del programma nazionale per la promozione dell'irrigazione privata in Benin.

Tipo di superficie servita	Superfici in ettari	
	1993	2001
Gestione a controllo totale: superfici formali	9240	9349
Gestione a controllo totale: superfici effettive	546	1624
Gestione a controllo parziale	450	1285
Totale	10236	12258

Tabella 9 Sviluppo dell'infrastruttura irrigua tra il 1993 e il 2001 (AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005)

Il dato di 12258 ettari, riportato in **Tabella 9** e corrispondente alla totalità delle superfici servite nel 2001, è però fuorviante: molte di quelle aree sono state attrezzate negli anni '70 e, ad oggi, non sono utilizzabili causa cattiva gestione tecnica, assenza di controlli e manutenzione e impoverimento del suolo. Attualmente infatti, solo il 23% dell'area servita viene effettivamente irrigata (**Tabella 7**).

In ultimo, si fa riferimento ancora al documento FAO del 2005 che riporta la distribuzione dei vari tipi di irrigazione e le loro percentuali di utilizzo (**Figura 37**). La componente preponderante è quella relativa all'irrigazione di superficie (46%) seguita dall'irrigazione a spruzzo (42%) ed infine dall'irrigazione localizzata (12%).

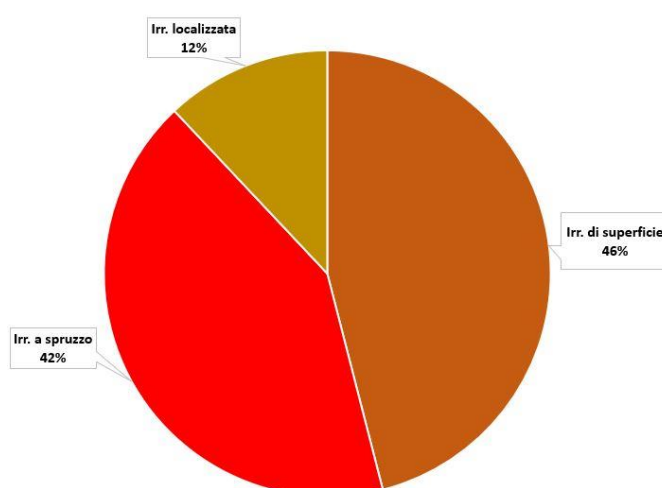


Figura 37 Percentuali di utilizzo dei diversi tipi di irrigazione (AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, 2005)

3.2 Evapotraspirazione e coefficiente colturale

Se per il fabbisogno idrico ad uso personale si prendono come riferimento gli input dati dalle organizzazioni internazionali, per quanto riguarda l'acqua da apportare alle colture l'approccio assume connotati più tecnici.

La porzione di pioggia che effettivamente raggiunge il suolo successivamente prosegue verso diverse destinazioni: una parte ruscella e va a formare o alimentare deflussi superficiali, un'altra parte supera lo strato superficiale e si accumula nel sottosuolo generando falde acquifere e corsi sotterranei mentre una terza parte si infiltra negli strati superficiali del terreno senza mai raggiungere elevate profondità e successivamente ritorna all'atmosfera tramite l'evapotraspirazione. Tutto quel quantitativo di pioggia che arriva nello strato utile del terreno e ivi persiste è definito "precipitazione efficace" e dipende, oltre che dall'apporto meteorico, anche da caratteristiche del terreno quali umidità, morfologia, porosità e dalla copertura vegetale e arborea presente nell'area. Un alto valore di precipitazione è favorito da una bassa intensità di pioggia, sia perché spesso gli eventi meno intensi sono quelli più duraturi, sia per il fatto che la velocità di infiltrazione deve essere maggiore dell'intensità di pioggia in modo tale da consentire un flusso verso il basso ed evitare l'immediata saturazione del mezzo poroso. L'evapotraspirazione, per la cui misura vi sono numerose possibilità (**Figura 38**) è definita come *"la quantità d'acqua che effettivamente evapora dalla superficie del terreno e traspira attraverso gli apparati fogliari delle piante, in determinate condizioni di temperatura (evapotraspirazione reale) oppure la quantità d'acqua che, alle medesime condizioni, evaporerebbe e traspirerebbe qualora nel suolo ve ne fosse sempre disponibile (evapotraspirazione potenziale)"* (Enciclopedia Treccani).

Come visto quindi dalla definizione, l'evapotraspirazione può essere considerata come la sovrapposizione di due fenomeni distinti che sono l'evaporazione e la traspirazione. L'evaporazione è quel processo in cui l'acqua, che inizialmente si trova in fase liquida nel terreno, si trasforma in vapore acqueo e viene dispersa nell'ambiente circostante; è un processo che non riguarda solo il suolo, ma si manifesta, in maniera estesa, in laghi, fiumi e oceani. Si passa quindi dallo stato liquido, in cui le particelle sono confinate e hanno poca libertà di movimento, allo stato gassoso in cui invece esse sono eccitate e libere di muoversi; è conseguente che affinché avvenga ciò è necessario un apporto energetico, che viene dal sole e dalla temperatura dell'ambiente, e una forza motrice dal basso verso l'alto che scaturisce dalla differenza tra la pressione dell'acqua e quella dell'atmosfera. Col passare del tempo il flusso diminuirà fino a terminare quando l'aria sarà satura di vapore e non ci sarà più la differenza di

pressione necessaria per il movimento. A questo punto l'aria satura di vapore persisterà nell'ambiente fino a quando non ci sarà un altro flusso, il vento, che rimpiazzerà l'aria umida con dell'aria secca e darà nuovamente avvio a tutto il processo. Da quanto descritto risulta intuitivo che il fenomeno dell'evaporazione è correlato a parametri climatici quali la temperatura e l'umidità dell'aria, la radiazione solare e infine la velocità del vento. Nel caso specifico in cui l'evaporazione avvenga su un suolo, ai parametri climatici già citati bisogna aggiungere la quantità di acqua disponibile che generalmente perviene dalle piogge, dall'irrigazione o dalle risalite di falda e l'esposizione alla radiazione solare. Quando l'evaporazione avviene in un suolo coltivato, vi è abbinato un secondo fenomeno: la traspirazione. Anche in questo caso si parte dall'acqua in fase liquida e si ha una vaporizzazione, ma la differenza con l'evaporazione risiede nel fatto che l'acqua è contenuta negli organismi vegetali. La pianta recupera l'acqua, ricca di nutrienti, mediante le radici e la diffonde all'interno degli altri apparati; una volta trattenuta l'acqua necessaria e assimilate le sostanze nutritive richieste per il suo ciclo vitale, la pianta, mediante processi negli spazi intercellulari delle foglie, vaporizza l'acqua ed espelle il vapore attraverso gli stomi, delle aperture poste nella pagina inferiore della foglia che regolano lo scambio di gas con l'atmosfera.

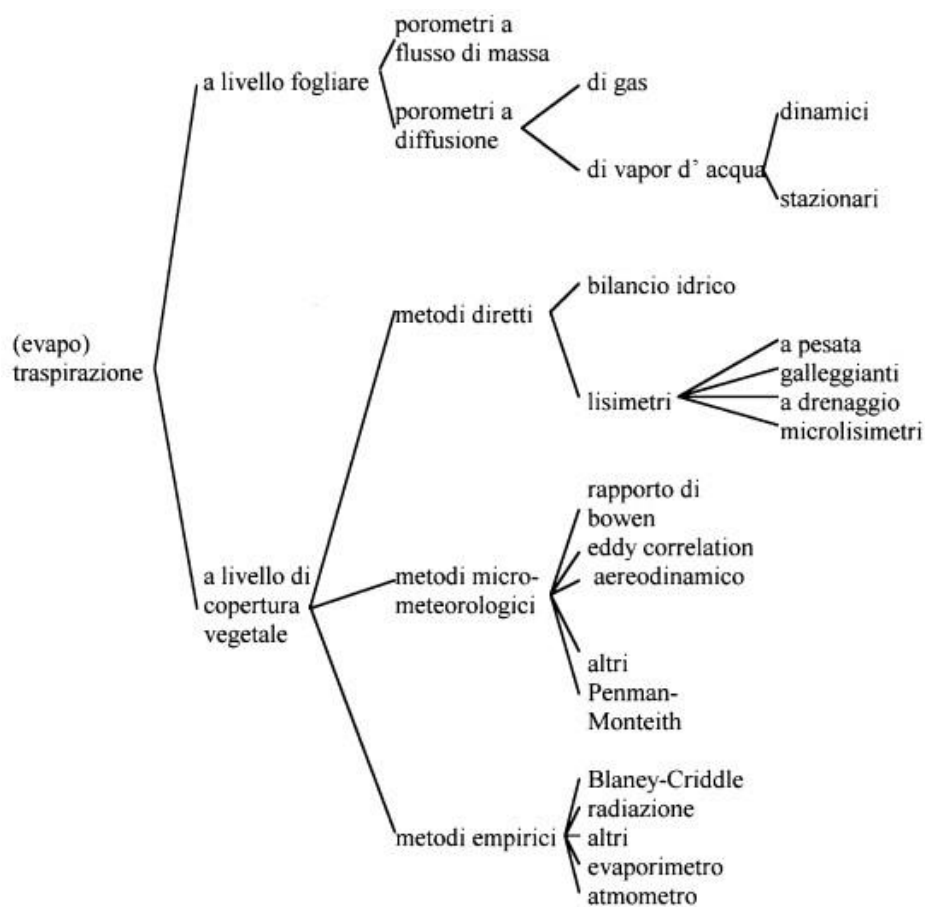


Figura 38 Metodi di stima e misura dell'evapotraspirazione (Perniola)

La traspirazione ha una forte dipendenza dai parametri climatici visti per l'evaporazione, ma a questi bisogna aggiungere anche il tipo di pianta, la fase di sviluppo e le tecniche di coltivazione.

In **Figura 39** si può apprezzare come cambia la percentuale di evaporazione (area sottesa dalla linea continua) rispetto al processo completo di evapotraspirazione nel corso dello sviluppo della pianta quantificato mediante il *Leaf Area Index* indicato con la linea tratteggiata. Quest'indice è il rapporto tra l'area fogliare e l'area del suolo e, ipotizzando verosimilmente una superficie del suolo costante, si può asserire che esso aumenta all'aumentare delle dimensioni della foglia e quindi con lo sviluppo della pianta.

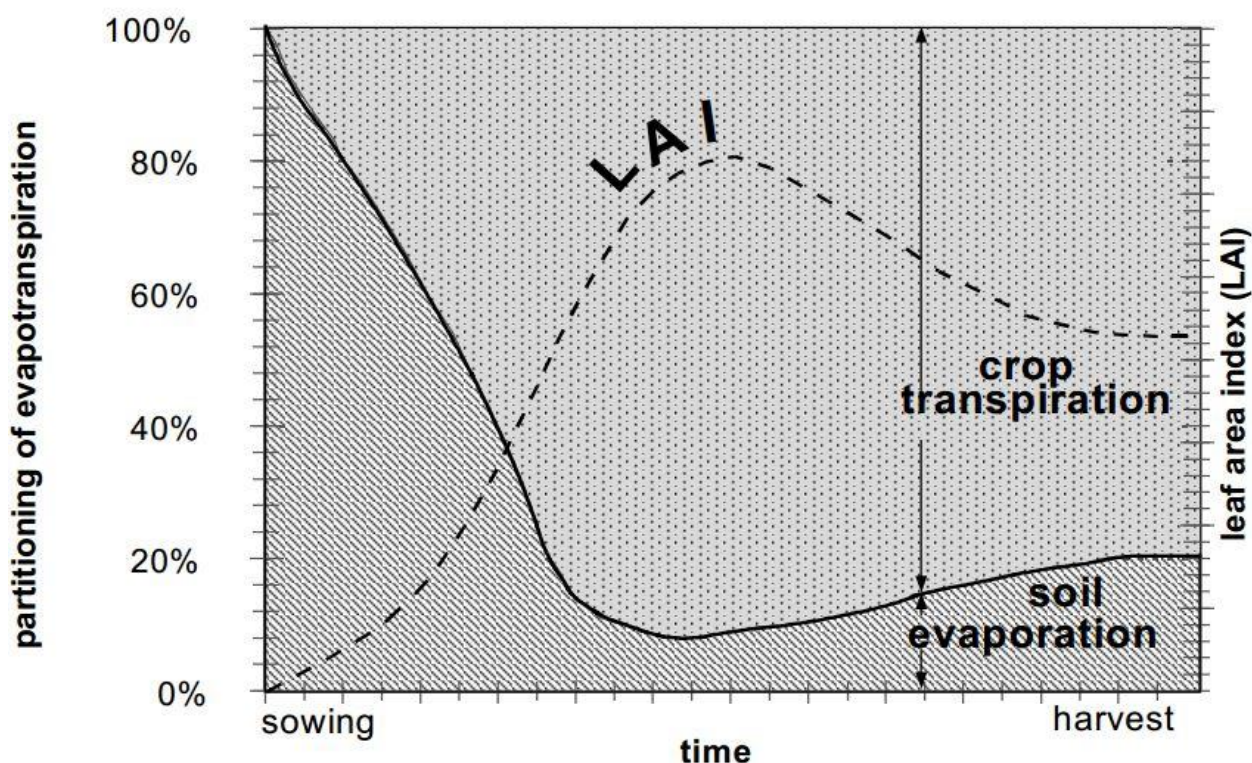


Figura 39 Andamento di evaporazione e traspirazione dalla semina al raccolto (Allen et al., 1998)

Quando si parla di evapotraspirazione non è sempre facile distinguere i due processi. Generalmente nella fase iniziale dello sviluppo della pianta il fenomeno predominante è l'evaporazione che va cedendo il posto alla traspirazione man mano che gli organismi vegetali crescono. La predominanza della traspirazione rispetto all'evaporazione è tanto marcata quanto più la coltura è estesa. L'unità di misura con la quale si indica l'evapotraspirazione è un'altezza d'acqua rapportata ad un'unità di tempo, il che sta a significare che l'evapotraspirazione è definita da un punto di vista dimensionale come una velocità; può essere vista come la velocità con la quale l'acqua si trasforma in vapore e fuoriesce dal suolo o dalle foglie. Per capire la giusta misura con la quale trattare i dati basti pensare che un'evapotraspirazione di 1 mm/giorno su un ettaro (10000 metri quadri) di campo coltivato coincide con una perdita d'acqua totale

che ammonta a 10 metri cubi. Esiste poi una formulazione alternativa, ma pur sempre equivalente, secondo la quale l'altezza d'acqua si sostituisce con il calore latente di vaporizzazione, indicato con λ , un termine che descrive l'energia ricevuta per unità di superficie ed è funzione della temperatura dell'acqua. Si stima che l'energia necessaria per far evapotraspirare 1 kg di acqua a temperatura 20°C sia pari a 2.45 MJ kg⁻¹. L'evapotraspirazione così espressa si indica con λET che è il flusso di calore latente (Allen *et al.*, 1998).

Ai fini dei calcoli è importante sottolineare che quando si parla di evapotraspirazione bisogna specificare il contesto e il tipo di evapotraspirazione, questo perché vi è una sorta di classificazione:

- si indica con ET_0 l'evapotraspirazione di riferimento: si utilizza un'ipotetica coltura ideale, individuata nella *Festuca arundinacea*, come condizione al contorno e si considera l'acqua sempre disponibile eliminando così la dipendenza dalle caratteristiche del suolo. Vengono imposte alcune caratteristiche: la coltura deve essere bassa, uniforme e fitta e lo stadio di riferimento è quello in cui la pianta si trova in piena attività vegetativa. ET_0 è un parametro che permette di capire qual è il massimo valore di acqua che può evapotraspirare prima che il sistema raggiunga l'equilibrio. Tale nozione è nata dall'esigenza di svincolare la richiesta di vapore dell'atmosfera dal tipo di coltura e dal suo stadio di crescita. Così facendo si ottiene un modello o, come dice il nome, un riferimento al quale i valori di evapotraspirazione di altre superfici possono rifarsi. Le uniche variabili all'interno di questo sistema sono legate ai parametri climatici. Per calcolare il valore di ET_0 si usa il metodo Penman-Monteith, fisicamente basato e che prende in considerazione anche parametri aerodinamici e fisiologici. La sua formulazione originaria è la seguente:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (11)$$

dove:

$R_n \rightarrow$ radiazione netta sulla superficie di riferimento [MJ m⁻² g⁻¹]

$G \rightarrow$ flusso di calore nel suolo [MJ m⁻²]

$e_a \rightarrow$ pressione di vapore effettiva in atmosfera [kPa]

$e_s \rightarrow$ pressione di vapore di saturazione [kPa]

$\rho_a \rightarrow$ densità media dell'aria a pressione costante [kg m⁻³]

$c_p \rightarrow$ calore specifico dell'aria [$\text{MJ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ kg}^{-1}$]

$\Delta \rightarrow$ pendenza della curva di saturazione temperatura-pressione vapore [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]

$\gamma \rightarrow$ costante psicometrica [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]

$r_s \rightarrow$ resistenza della superficie coltivata [s m^{-1}]

$r_a \rightarrow$ resistenza aerodinamica [s m^{-1}]

Ognuno di questi parametri meriterebbe un approfondimento sulla genesi e sui metodi di stima o misura che qui non sarà presente per esigenze di sintesi. Quello che si può dire è che le formulazioni delle due resistenze rivestono grande importanza perché andando ad esplicitarle per la coltura presa come riferimento e assumendo il giorno come unità della scala temporale si perviene ad una reinterpretazione dell'equazione originaria, definita come equazione FAO Penman-Monteith:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (12)$$

dove:

$T \rightarrow$ media giornaliera della temperatura dell'aria a 2 metri di altezza [$^\circ\text{C}$]

$G \rightarrow$ densità del flusso di calore nel suolo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ g}^{-1}$]

$u_2 \rightarrow$ velocità del vento a 2 metri di altezza [m s^{-1}], dedotta a partire dalla velocità del vento a 10 metri di altezza, u_{10} :

$$u_2 = u_{10} \frac{\ln(128)}{\ln(661.3)} \quad (13)$$

Come è evidente dall'equazione (12), il calcolo necessita di misure di radiazione solare, temperatura dell'aria, umidità e velocità del vento ed è importante che le misurazioni delle grandezze in gioco vengano effettuate a 2 metri di altezza. L'equazione così determinata non descrive con precisione l'evapotraspirazione in ogni situazione climatica, ma serve per confrontare le evapotraspirazioni calcolate in periodi diversi dell'anno o in zone diverse, per mettere in relazione diverse colture e per ricavare i vari coefficienti colturali.

- Si indica con ET_c l'evapotraspirazione potenziale che si raggiunge in condizioni standard: essa è relativa a superfici di grandi dimensioni in cui la coltura è sana, i campi sono ben fertilizzati, le condizioni di umidità del terreno sono ottimali e si raggiunge la produzione massima. Questo tipo di evapotraspirazione è definita potenziale in quanto si ha quando il quantitativo di acqua nel suolo non è un elemento limitante del sistema e di conseguenza, se non ci fossero i parametri climatici e, in particolare, l'umidità dell'aria a frenare l'evapotraspirazione per raggiunto equilibrio di pressione, il suolo potrebbe evapotraspirare all'infinito. ET_c è un parametro che dà la misura di quanta umidità è richiesta dall'aria per raggiungere l'equilibrio ed è totalmente indipendente dal tipo di coltura e dalle tecniche di coltivazione mentre le grandezze che influenzano l'evapotraspirazione potenziale sono il vento, la radiazione e la temperatura dell'aria e della superficie. La sua definizione (Allen *et al.*, 1998) è necessaria per andare a determinare il fabbisogno idrico:

$$FI = ET_c \cdot A \quad (14)$$

dove A è la superficie coltivata, misurata usualmente in ettari (ha), mentre ET_c è misurato solitamente in millimetri al giorno.

- Si indica con $ET_{c,adj}$ l'evapotraspirazione potenziale in condizioni diverse da quelle standard. Il fatto che le condizioni differiscano da quelle standard può essere dovuto a diversi fattori tra cui la presenza di parassiti, la scarsità d'acqua o la poca fertilità del suolo. Per pervenire al calcolo di questo tipo di evapotraspirazione bisogna utilizzare un coefficiente correttivo.

Le evapotraspirazioni appena descritte non sono svincolate l'una dall'altra, ma anzi possono essere combinate insieme. Andando a dividere l'evapotraspirazione potenziale ET_c per l'evapotraspirazione di riferimento ET_0 si ottiene il coefficiente colturale K_c :

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (15)$$

K_c è un coefficiente adimensionale che varia in base al tempo, infatti si ha un coefficiente iniziale $K_{c,ini}$, un coefficiente di crescita $K_{c,mid}$ e un coefficiente nella fase di raccolta $K_{c,end}$.

Oltre alla stagionalità, il valore di Kc registra delle oscillazioni anche in base alle condizioni climatiche da cui dipende ET_0 e soprattutto in base alle caratteristiche specifiche della coltura individuate in:

- altezza della coltivazione, in quanto essa ha una forte influenza sulla resistenza aerodinamica la quale contribuisce a determinare quanto calore e quanto vapore acqueo fluiscono dalla superficie coltivata all'atmosfera. Considerando il fatto che il termine di resistenza r_a compare due volte nell'equazione originaria di Penman-Monteith, allora questa dipendenza è molto forte. Esso è strettamente correlato alla velocità del vento: Kc è tanto più grande quanto maggiore è la velocità del vento e quanto minore è invece l'umidità relativa e da ciò ne consegue che per climi aridi e ventosi il coefficiente colturale sarà alto. Ciò è determinato dal deficit di pressione ($e_s - e_a$) che amplifica la differenza tra il termine di resistenza aerodinamica della coltura di riferimento e quello della generica coltura. Al contrario, in climi umidi e poco ventosi Kc ha scarsa significatività e si attesta su valori poco distanti da 1 stabilendo quindi un'effettiva eguaglianza tra ET_0 ed ET_c derivante dal fatto che nella situazione di completa copertura vegetale sia le generiche colture che la coltura di riferimento riescono ad assorbire quasi tutta la radiazione solare incidente che è la principale fonte di energia per l'evaporazione in condizioni umide.
- resistenza della copertura arborea, intesa come chioma o fogliame, in quanto essa, insieme alla resistenza del suolo nudo, determina il valore di resistenza della superficie coltivata r_s ;
- albedo della superficie coltivata, ovvero la radiazione di luce solare riflessa, la quale ovviamente è strettamente correlata alla radiazione netta incidente R_n ;
- evaporazione di acqua dal suolo.

Si può affermare quindi che a causa delle caratteristiche elencate il valore di ET_c differisce dal riferimento ET_0 . Ad esempio, una elevata altezza della coltivazione associata ad una resistenza della copertura consistente porta ad avere un Kc maggiore di 1, il che sta a significare che l'evapotraspirazione potenziale è maggiore di quella di riferimento. Valori tipici del coefficiente colturale Kc si possono osservare in **Figura 40**.

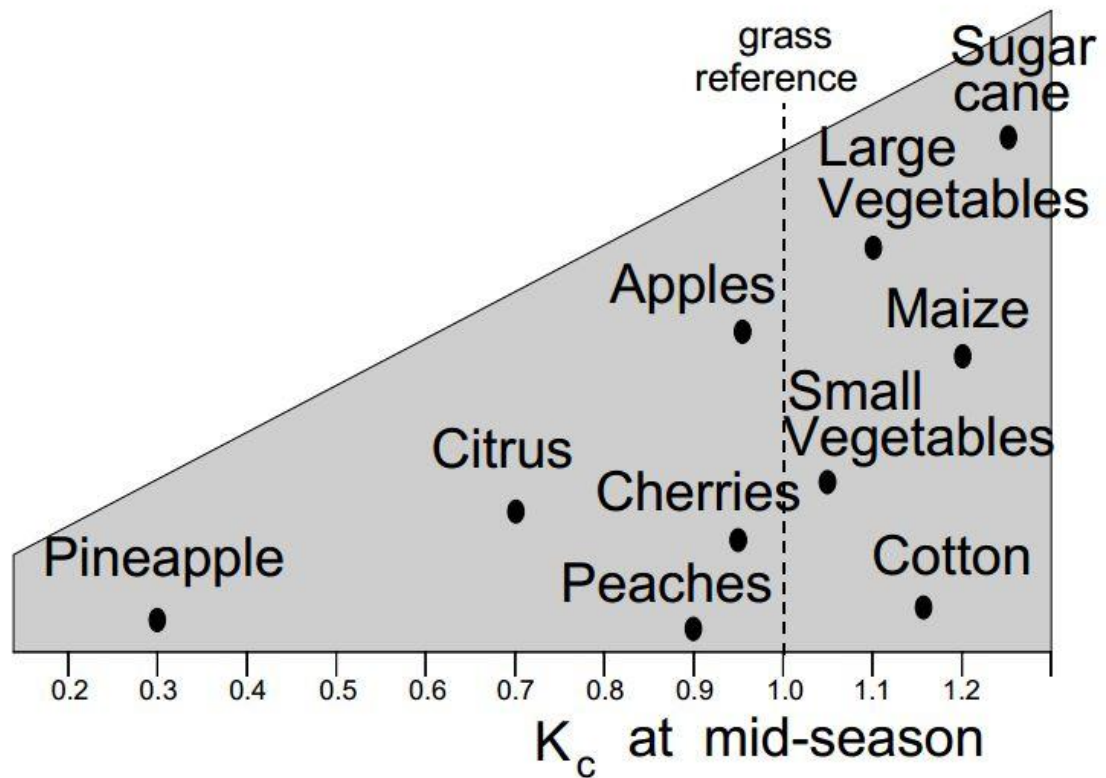


Figura 40 Valori tipici di K_c per diverse colture (Allen *et al.*, 1998)

A seconda dello scopo per il quale si vuole adoperare il coefficiente colturale K_c , si può scegliere tra due visioni alternative (Allen *et al.*, 1998): quella presupposta finora, che prevede l'utilizzo di un unico coefficiente K_c oppure quella che vede il coefficiente K_c come somma distinta di due altri coefficienti.

Nel primo caso il coefficiente riassume in sé gli effetti combinati della traspirazione delle piante e dell'evaporazione dal terreno; poiché l'evaporazione ha un'oscillazione su scala giornaliera dovuta alle precipitazioni o all'irrigazione, il coefficiente colturale singolo esprime un valore di evapotraspirazione mediato nel tempo e viene utilizzato quando i periodi sono abbastanza lunghi (settimane, mesi). Questo tipo di approccio è valido, ad esempio, per una pianificazione dell'irrigazione e sarà l'approccio che si seguirà nei calcoli.

Nel secondo caso si usano due coefficienti: il coefficiente colturale di base (K_{cb}) che descrive la traspirazione delle piante e il coefficiente di evaporazione dal suolo (K_e). K_{cb} è definito come K_c , quindi il rapporto tra ET_c e ET_0 , nella situazione in cui lo strato superficiale è secco, ma l'acqua contenuta nel terreno è sufficiente a garantire una piena completa traspirazione delle piante. K_e invece descrive l'evaporazione e dipende chiaramente dall'apporto idrico o irriguo alla superficie di coltura. Questo tipo di approccio è più accurato e preciso rispetto all'approccio usando un singolo coefficiente, però comporta un elevato carico computazionale.

Dal momento che le piante sono esseri viventi, esse hanno un certo sviluppo che comporta dei cambiamenti delle caratteristiche fisiche e dei processi interni e per questo motivo il singolo coefficiente colturale K_c che si vuole utilizzare non può essere considerato costante lungo tutto l'arco di vita della pianta, ma subisce delle variazioni a seconda dello stadio di crescita. Nel documento “*Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*” la FAO ha individuato quattro step di crescita (**Figura 41**): lo stadio iniziale, lo stadio in cui la coltura cresce e si sviluppa, lo stadio di metà stagione in cui si ha una pianta matura e lo stadio di fine stagione in cui la pianta si appresta a morire.

Il primo stadio può essere individuato come quella fase che va dalla piantumazione fino ad una copertura, intesa come porzione del territorio occupata dalla piantagione o dalla sua ombra, del 10% del terreno e la sua estensione temporale varia con il clima, il tipo di coltura e il periodo di semina. Per i sempreverdi, il periodo iniziale si intende finito quando cominciano a formarsi nuove foglie. Come è facile dedurre da quanto detto, in questo stadio si ha una predominanza dell'evaporazione dal suolo in quanto le foglie, quando presenti, sono ancora piccole e contribuiscono in misura molto ridotta al processo di evapotraspirazione. Per questo il coefficiente K_c è grande quando vi è un buon quantitativo d'acqua nel terreno (irrigazione, precipitazioni) mentre è piccolo se il terreno è secco e le piante non sono ancora nella condizione di traspirare.

La seconda fase parte dal momento in cui il campo è coperto per il 10% fino al raggiungimento della totale copertura dell'area che si ha generalmente in corrispondenza del periodo di fioritura; maggiore sarà l'altezza delle piante, prima si raggiungerà la piena copertura della superficie. La fioritura è un buon metodo per capire quando si è arrivati alla piena copertura, ma, in alternativa, si potrebbe utilizzare il LAI (*Leaf Area Index*) che è l'area totale media occupata dal fogliame divisa per unità di area del terreno nudo. In questa fase, proprio per l'aumento della copertura vegetale e dell'ombra al terreno, si ha un ribaltamento degli equilibri del processo di evapotraspirazione: l'evaporazione va via via riducendosi lasciando il posto all'attività traspirante delle piante ormai nel pieno della crescita.

La fase successiva è quella di metà stagione che parte dal momento in cui il campo è interamente coperto fino all'inizio della maturazione finale delle piante la quale è deducibile da ingiallimento e caduta delle foglie (o di eventuali frutti) e generale perdita di vigore dell'intero apparato vegetale. Per le piante perenni e per la maggior parte delle piante annuali questo è lo stadio più lungo.

L'ultima fase è quella di decadenza, che va dall'inizio della maturazione fino al raccolto o alla morte della pianta.

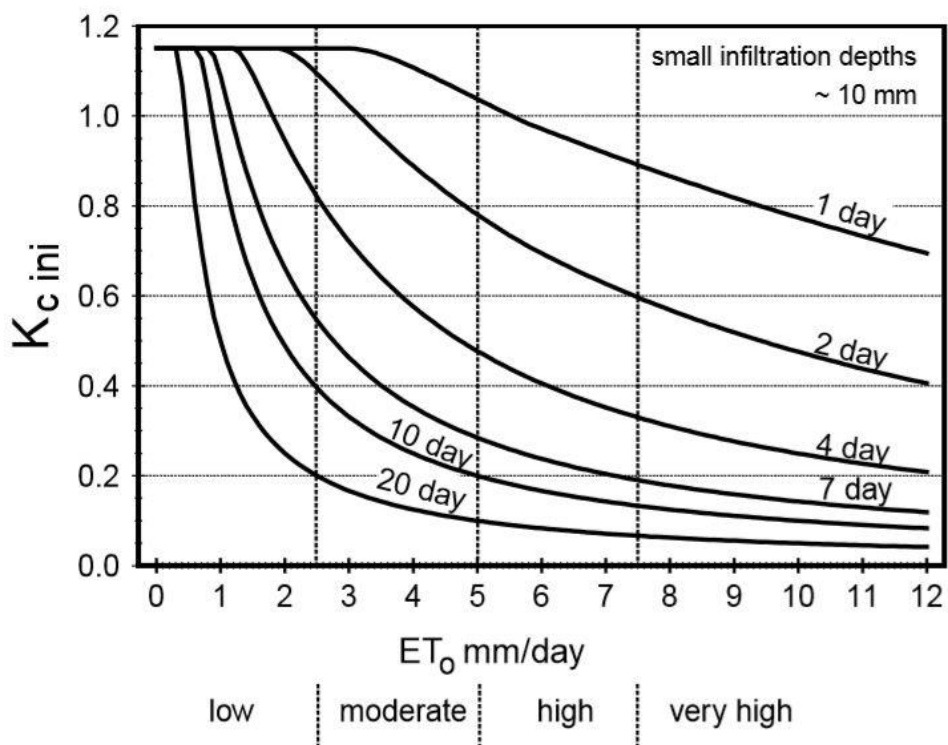


Figura 42 Metodo grafico per ricavare il valore di $K_c ini$ nel caso di infiltrazione modesta (Allen et al., 1998)

Nel caso di infiltrazione profonda vi sono due grafici distinti che fanno riferimento rispettivamente a suoli grossolani (Figura 43) e a suoli a grana media e fine (Figura 44).

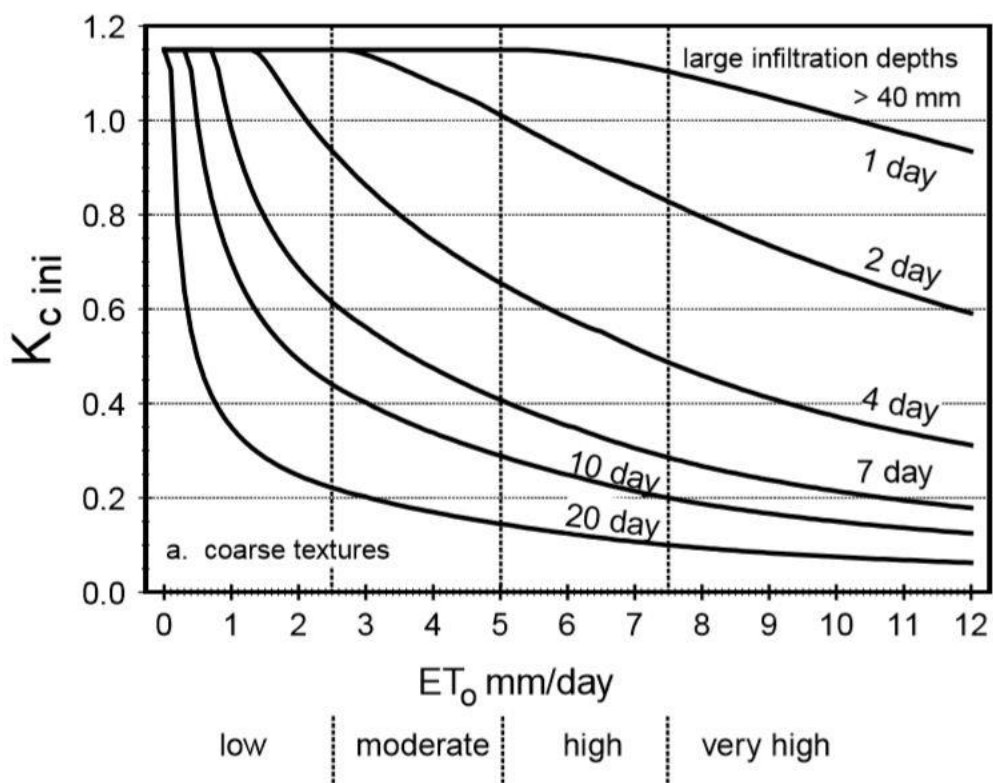


Figura 43 Metodo grafico per ricavare il valore di $K_c ini$ nel caso di infiltrazione profonda in suoli a pezzatura grossolana (Allen et al., 1998)

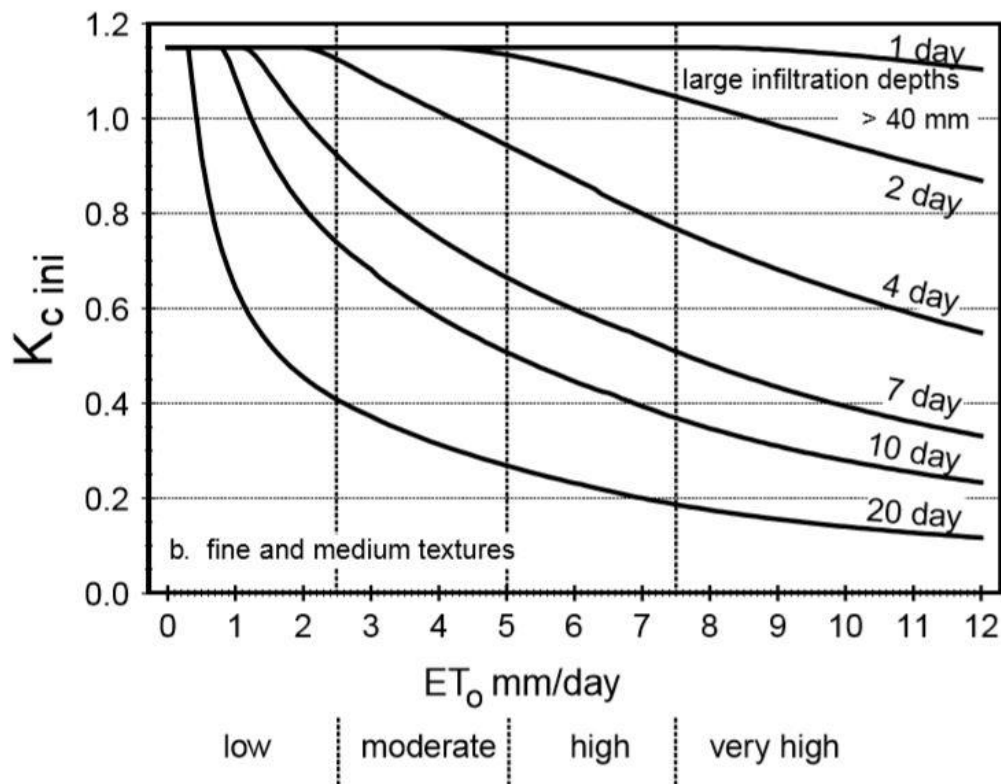


Figura 44 Metodo grafico per ricavare il valore di $K_{c\ ini}$ nel caso di infiltrazione profonda in suoli a pezzatura media e fine (Allen et al., 1998)

Nel caso in cui la profondità di infiltrazione I abbia un valore compreso tra 10mm e 40mm, allora si combinano i contributi dei due grafici mediante la seguente formula:

$$K_{c\ ini} = K_{c\ ini\ (Fig.38)} + \frac{I - 10}{40 - 10} [K_{c\ ini\ (I > 40mm)} - K_{c\ ini\ (I < 10mm)}] \quad (16)$$

Talvolta il valore di $K_{c\ ini}$, determinato come descritto in precedenza, necessita di una modifica legata al tipo di irrigazione alla quale sono sottoposte le varie colture. Infatti, vi sono alcuni casi in cui solo una porzione del territorio viene effettivamente irrigata (o, per grandissime estensioni, investita da precipitazioni) e, in quest'eventualità, si ricorre all'utilizzo del moltiplicatore f_w (valori compresi tra 0 e 1) che indica la frazione di superficie irrigata o bagnata dalla pioggia. Lo stesso moltiplicatore poi può essere usato per risalire all'irrigazione della sola frazione umida.

Per quanto riguarda il coefficiente culturale per le fasi intermedie $K_{c\ mid}$, la considerazione che si pone in evidenza è differente. Si è detto che i valori standard che si trovano nell'articolo della FAO precedentemente menzionato fanno riferimento ad un clima sub-umido perciò in alcune

circostanze occorre adattare questi dati a climi differenti, determinati anch'essi da umidità relativa minima RH_{min} e da velocità del vento a 2 metri di altezza u_2 . La conversione poggia sulla seguente equazione:

$$K_{c_{mid}} = K_{c_{mid_subumido}} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (17)$$

Quanto spiegato trova applicazione grafica in **Figura 45** che rappresenta le modifiche da apportare in base al tipo di clima, all'altezza della coltura e alla velocità del vento:

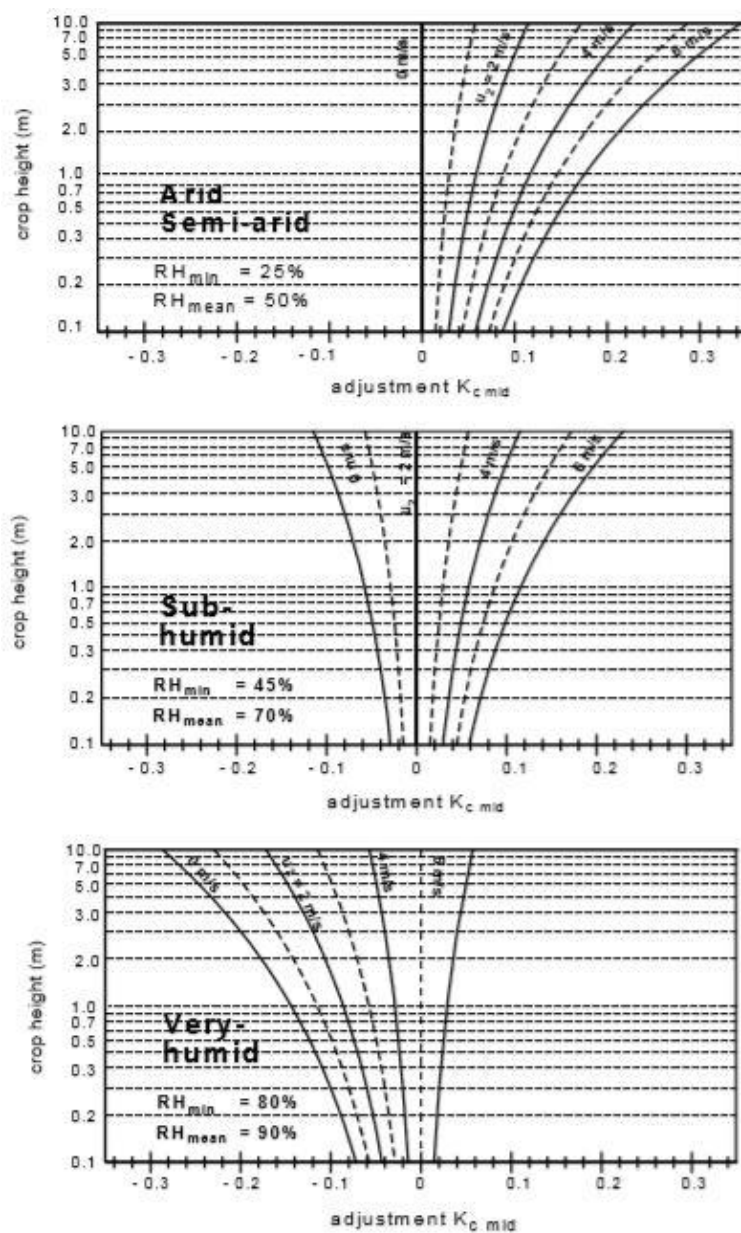


Figura 45 Grafici che restituiscono la modifica da apportare al valore di $K_{c_{mid}}$ per clima sub-umido (Allen et al., 1998)

Anche nel caso di Kc, mid vi possono essere delle modifiche dovute alla frequenza con la quale il suolo viene bagnato, seppur in questo caso tale frequenza sia meno influente perché la coltura è in uno stadio in cui riesce a coprire gran parte della superficie e quindi relega il processo di evaporazione dell'acqua dal terreno ad un ruolo secondario. Se l'irrigazione è più frequente di una volta ogni tre giorni e se il valore di Kc, mid del clima sub-umido, preso come riferimento, è minore di 1, allora il Kc, mid modificato sarà compreso tra 1.1 e 1.3.

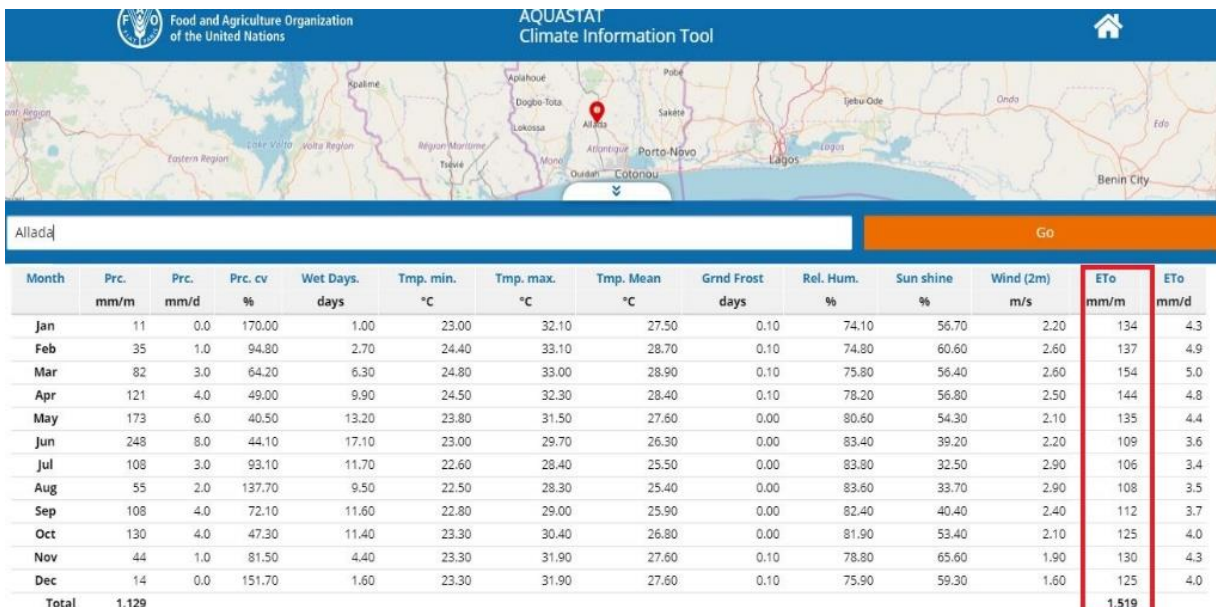
La modifica del valore standard di Kc, end deve tenere conto di un altro aspetto: per alcune colture si procede al raccolto quando la pianta è ancora in salute e quindi quando lo strato superiore del terreno viene ancora umidificato, mentre per altre colture il raccolto lo si ha una volta che la pianta si avvia verso la senescenza e quindi quando non viene più fornita acqua al suolo. Conseguentemente si otterrà un valore di Kc, end alto nel primo caso mentre Kc, end sarà minore nel secondo caso. Inoltre, come si è visto per Kc, mid anche qui si usa la seguente equazione per adattare il valore di Kc, end a climi diversi da quello sub-umido:

$$Kc_{end} = Kc_{end_subumido} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RHmin - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (18)$$

3.3 Calcolo dell'evapotraspirazione mensile ET_c per diversi tipi di coltura

Come visto nel paragrafo precedente, il calcolo che porta a determinare quanti millimetri di acqua sono necessari a contrastare l'evapotraspirazione di un terreno coltivato in un mese passa dalla definizione numerica del coefficiente colturale (che, si ricorda, non è costante nell'arco dell'anno) e dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 . Questi due possono essere considerati come i parametri di partenza da inserire nel processo che porterà all'obiettivo finale: il calcolo della ET_c mensile per le diverse colture. Successivamente, aggiungendo ai valori di partenza anche le superfici coltivate, si otterrà il fabbisogno idrico.

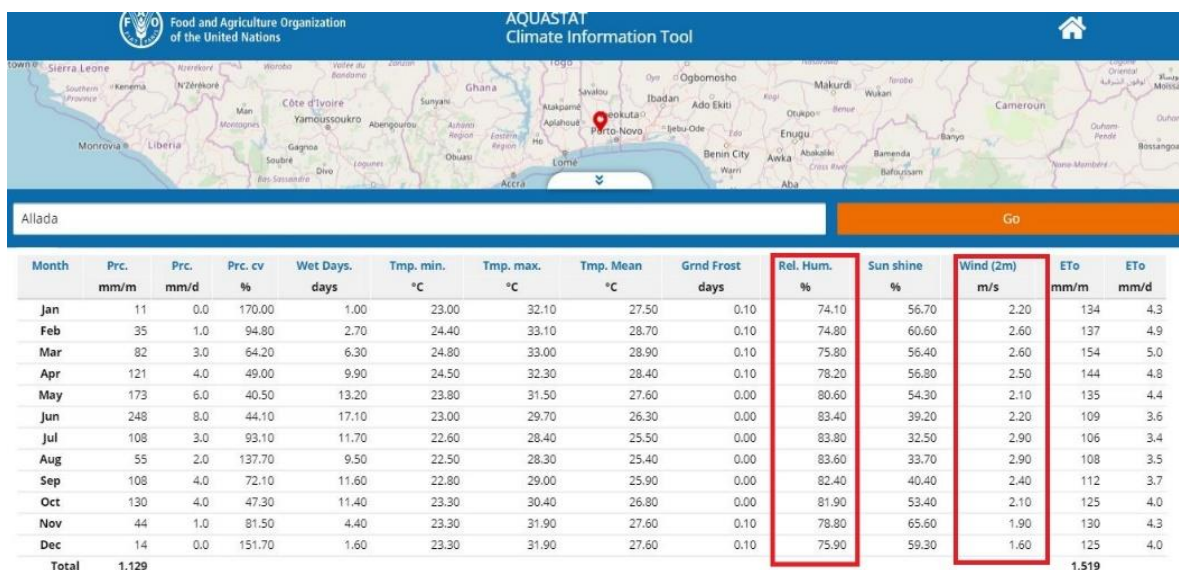
Per prima cosa ci si è focalizzati sulla ricerca dei valori di evapotraspirazione, per recuperare i quali si è consultato il database *AQUASTAT*. Esso è un sistema informativo globale che si concentra sulle risorse idriche e la gestione dell'acqua a fini agricoli e fornisce libero accesso a variabili e indicatori, anche localizzati, a partire dall'anno 1960. Una volta inserita la città di interesse, Allada, si è ottenuto quanto illustrato in **Figura 46**.



Month	Prc. mm/m	Prc. mm/d	Prc. cv %	Wet Days. days	Tmp. min. °C	Tmp. max. °C	Tmp. Mean °C	Grnd Frost days	Rel. Hum. %	Sun shine %	Wind (2m) m/s	Eto mm/m	Eto mm/d
Jan	11	0.0	170.00	1.00	23.00	32.10	27.50	0.10	74.10	56.70	2.20	134	4.3
Feb	35	1.0	94.80	2.70	24.40	33.10	28.70	0.10	74.80	60.60	2.60	137	4.9
Mar	82	3.0	64.20	6.30	24.80	33.00	28.90	0.10	75.80	56.40	2.60	154	5.0
Apr	121	4.0	49.00	9.90	24.50	32.30	28.40	0.10	78.20	56.80	2.50	144	4.8
May	173	6.0	40.50	13.20	23.80	31.50	27.60	0.00	80.60	54.30	2.10	135	4.4
Jun	248	8.0	44.10	17.10	23.00	29.70	26.30	0.00	83.40	39.20	2.20	109	3.6
Jul	108	3.0	93.10	11.70	22.60	28.40	25.50	0.00	83.80	32.50	2.90	106	3.4
Aug	55	2.0	137.70	9.50	22.50	28.30	25.40	0.00	83.60	33.70	2.90	108	3.5
Sep	108	4.0	72.10	11.60	22.80	29.00	25.90	0.00	82.40	40.40	2.40	112	3.7
Oct	130	4.0	47.30	11.40	23.30	30.40	26.80	0.00	81.90	53.40	2.10	125	4.0
Nov	44	1.0	81.50	4.40	23.30	31.90	27.60	0.10	78.80	65.60	1.90	130	4.3
Dec	14	0.0	151.70	1.60	23.30	31.90	27.60	0.10	75.90	59.30	1.60	125	4.0
Total	1,129											1,519	

Figura 46 Finestra del database AQUASTAT, dati di evapotraspirazione (FAO)

Si è pervenuti immediatamente al valore mensile di evapotraspirazione di riferimento, ritenuto affidabile e appropriato allo scopo sia in virtù dell'autorevolezza della fonte che in considerazione del fatto che i valori ottenuti sono tarati esattamente sulla località oggetto di studio. Dalla finestra rappresentata in **Figura 47** poi vengono desunte delle altre informazioni importanti per i successivi calcoli, quali l'umidità relativa e la velocità del vento.



Month	Prc. mm/m	Prc. mm/d	Prc. cv %	Wet Days. days	Tmp. min. °C	Tmp. max. °C	Tmp. Mean °C	Grnd Frost days	Rel. Hum. %	Sun shine %	Wind (2m) m/s	Eto mm/m	Eto mm/d
Jan	11	0.0	170.00	1.00	23.00	32.10	27.50	0.10	74.10	56.70	2.20	134	4.3
Feb	35	1.0	94.80	2.70	24.40	33.10	28.70	0.10	74.80	60.60	2.60	137	4.9
Mar	82	3.0	64.20	6.30	24.80	33.00	28.90	0.10	75.80	56.40	2.60	154	5.0
Apr	121	4.0	49.00	9.90	24.50	32.30	28.40	0.10	78.20	56.80	2.50	144	4.8
May	173	6.0	40.50	13.20	23.80	31.50	27.60	0.00	80.60	54.30	2.10	135	4.4
Jun	248	8.0	44.10	17.10	23.00	29.70	26.30	0.00	83.40	39.20	2.20	109	3.6
Jul	108	3.0	93.10	11.70	22.60	28.40	25.50	0.00	83.80	32.50	2.90	106	3.4
Aug	55	2.0	137.70	9.50	22.50	28.30	25.40	0.00	83.60	33.70	2.90	108	3.5
Sep	108	4.0	72.10	11.60	22.80	29.00	25.90	0.00	82.40	40.40	2.40	112	3.7
Oct	130	4.0	47.30	11.40	23.30	30.40	26.80	0.00	81.90	53.40	2.10	125	4.0
Nov	44	1.0	81.50	4.40	23.30	31.90	27.60	0.10	78.80	65.60	1.90	130	4.3
Dec	14	0.0	151.70	1.60	23.30	31.90	27.60	0.10	75.90	59.30	1.60	125	4.0
Total	1,129											1,519	

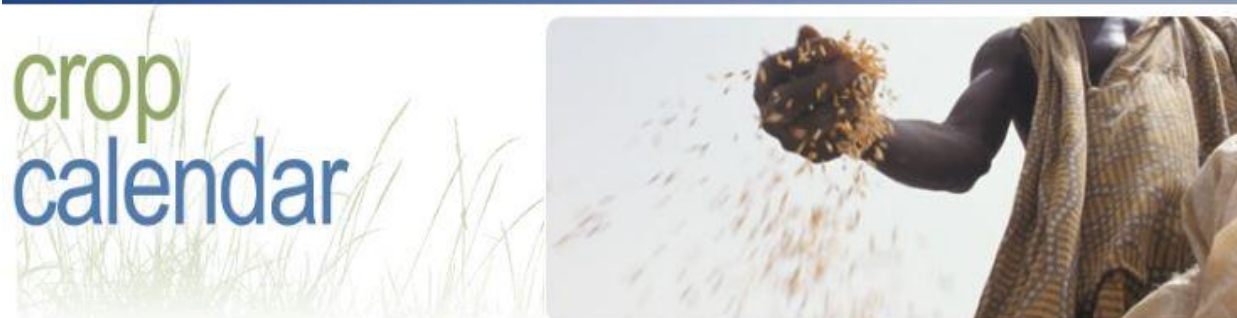
Figura 47 Finestra del database AQUASTAT, dati di umidità e velocità del vento (FAO)

La prima, espressa in percentuale, è il rapporto tra la pressione parziale del vapore e la pressione di vapore saturo, ovvero quella pressione oltre la quale, a parità di temperatura, il vapore inizierebbe a condensare in acqua; da ciò se ne deduce che un'umidità relativa del 100% è la massima possibile e l'immissione di altro vapore andrebbe ad aumentare il processo di condensazione, ma senza influire sul valore di umidità. La seconda grandezza è la velocità del vento a 2 metri di altezza. La quota alla quale viene misurata questa velocità è una convenzione necessaria a garantire una misura accurata e poco influenzata da eventuali ostacoli. Entrambi i parametri appena descritti vedono la loro applicazione nella modifica dei valori tipici di K_c . In particolare, le grandezze usate saranno due: il minimo valore di umidità relativa mensile, calcolato pari a 74.1% e il valor medio della velocità a 2 metri di altezza pari a 2.3 m/s. A queste si aggiunge l'altezza massimo raggiunta dalla coltura il cui valore è ricavabile dall'articolo della FAO intitolato *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing water requirements*, scelto anche come fonte dei diversi K_c . Le formule con le quali si modificano i coefficienti colturali sono le equazioni (17) e (18) descritte nel paragrafo precedente.

Come già visto, il coefficiente colturale cambia in base al tipo di coltura e in base al periodo dell'anno. Per questo motivo, si è resa necessaria una ricerca sia sulle coltivazioni più comuni su scala nazionale che sui periodi di semina su scala locale. Anche per questo scopo si è utilizzato uno strumento messo a disposizione sul sito della FAO, il *Crop Calendar*, col quale si è indicato dapprima lo stato (Benin) in modo da ottenere le colture tipiche e, successivamente, la zona agro-ecologica, individuata nella *Barre Land Zone* nella cui descrizione viene citata la città di Allada, per ottenere i diversi periodi colturali.

A questo punto si sono incrociate le colture specifiche ottenute dal *Crop Calendar* con le colture i cui valori tipici di K_c risultano indicati all'interno della fonte scelta (Allen *et al.*, 1998) e, tramite questa elaborazione, si è arrivati ad un elenco di colture tipiche per le quali sono presenti indicazioni relative ai periodi di vita della pianta (semina, crescita, raccolta) e alla richiesta d'acqua.

Per avere un'idea dell'interfaccia utilizzata e per capire come è organizzata la ricerca del dato di interesse all'interno del tool utilizzato, la **Figura 48** mostra la pagina iniziale del *Crop Calendar* per lo stato del Benin e per l'area de *La Terre de Barre*, indicata in inglese come "Barre Land Zone".



country Benin back

agro ecological zones

<input type="checkbox"/>	All agro-ecological zones	
<input checked="" type="checkbox"/>	Barre Land Zone	Divisions: Atlantic coastal, Mono Couffo, Ouémé-Plateau, Zou-Hills. Relief: a set of clayey-sandy pl..
<input type="checkbox"/>	Cotton-Producing Zone of the North	Divisions: Borgou-Alibori departments, Atacora-Donga; Relief: vast peneplain surmounted in part by t..
<input type="checkbox"/>	Cotton-producing Zone of Centre Benin	Divisions: Atacora-Donga, Borgou-Alibori, Zou-Collines, Mono Couffo and Ouémé - Plateau. Relief: hil..
<input type="checkbox"/>	Depression Zone	Divisions: Atlantic Littoral, Mono Couffo and Ouémé-Plateau. Relief: Vast flat furrows linking up wi..
<input type="checkbox"/>	Far North	Divisions: Borgou-Alibori (Far North). Relief: plates covering large summits. Soils: tropical ferrug..
<input type="checkbox"/>	Fishing Zone	Divisions: Atlantic Littoral, Mono Couffo and Ouémé-Plateau. Relief: uniform, flat sandy strip with ..
<input type="checkbox"/>	Food-Producing Zone of South Borgou	Divisions: Borgou-Alibori, Atacora-Donga; relief: vast peneplain surmounted in part by tabular hills..
<input type="checkbox"/>	Northwest Atacora Zone	Departments: Atacora-Donga. Relief: hilly in parts, sprinkled with the highest mountainous chains of..

select by group

- CEREALS
- LEGUMINOUS CROPS
- OIL AND SUGAR CROPS
- ROOT/TUBER CROPS
- VEGETABLES

select by crop

- Bambara groundnut
- Benniseed
- Black-eye pea
- Cajan pea
- Cassava
- Corn
- Cowpea
- Cucumber, snake
- Fonio
- Groundnut
- Hyacinth bean
- Lady's-fingers
- Maize
- Manioc
- Millet baira

select by scientific name

- Abelmoschus esculentus (L.) Moer
- Allium cepa L.
- Arachis hypogaea L.
- Cajanus cajan (L.) Millsp.
- Colocasia esculenta (L.) Schott
- Cucumis melo L. subsp. melo var. :
- Digitaria exilis (Kippist) Stapf
- Dioscorea spp.
- Dolichos lablab L.
- Glycine max (L.) Merr.
- Ipomoea batatas (L.) Lam.
- Lycopersicon esculentum Mill.
- Manihot esculenta Crantz
- Oryza sativa L.
- Pennisetum glaucum (L.) R. Br.

view download view download view download

Figura 48 Vista del tool FAO chiamato 'Crop calendar' (www.fao.org/agriculture/seed/cropcalendar/searchbycountry.do)

Le colture selezionate, risultato del procedimento appena descritto basato su dati FAO, sono nove:

- Arachide (*Arachis hypogaea*)
- Fagiolo di soia (*Glycine max*)

- Fagiolo ‘occhio nero’ (*Vigna unguiculata*)
- Mais (*Zea mays*)
- Manioca (*Manihot esculenta*)
- Patata dolce (*Ipomoea batatas*)
- Pomodoro (*Lycopersicon esculentum*)
- Riso (*Oryza sativa*)
- Sorgho (*Sorghum bicolor* o *sorghum vulgare*)

Il processo che si è seguito per ottenere i dati di interesse è ben descritto dalla **Figura 49** presente nella pagina successiva.

Partendo dalle due fonti principali (il tool *Crop Calendar* e Allen *et al.*, 1998), si è ipotizzata un’irrigazione totale, quindi, per ognuna della nove colture prese in esame, si sono modificati i valori dei coefficienti colturali K_c in base al clima locale (equazioni (17) e (18)). Tali valori di K_c sono stati poi associati ai rispettivi periodi colturali. Nei paragrafi successivi, per ciascuna delle nove colture considerate si riportano i seguenti grafici:

- variabilità intra-annuale dei valori di K_c modificati;
- variabilità intra-annuale dei valori di evapotraspirazione ET_c (equazione (15));
- variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazione ed evapotraspirazione ET_c (eccedenza o deficit irriguo). Per il calcolo di quest’ultimo si segue la (19):

$$ED = P_{diretta\ sulle\ colture} - ET_c \quad (19)$$

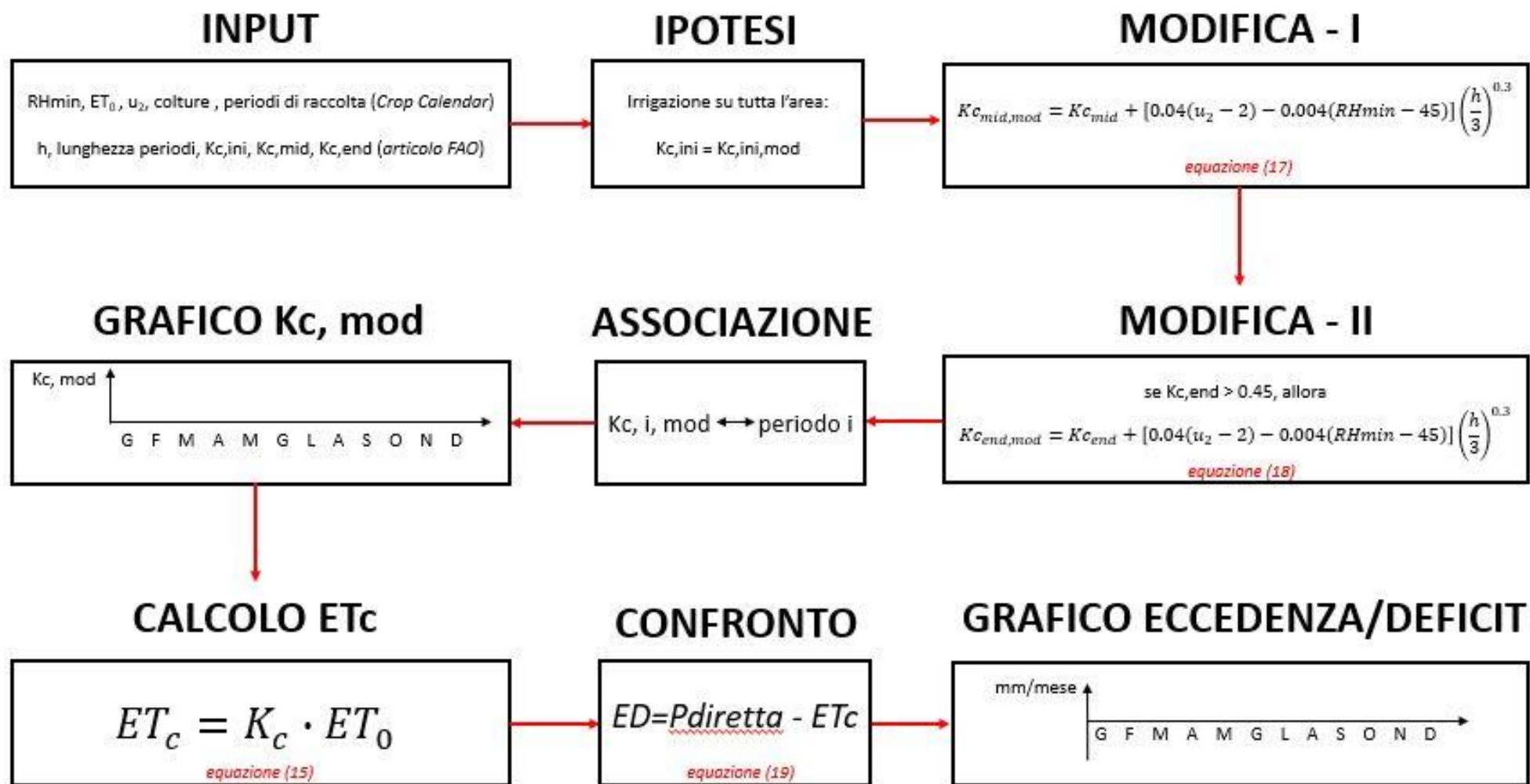


Figura 49 Diagramma esplicativo degli step seguiti per ottenere il bilancio tra precipitazioni e richiesta idrica delle diverse colture

3.3.1 Arachide (*Arachis hypogaea*)

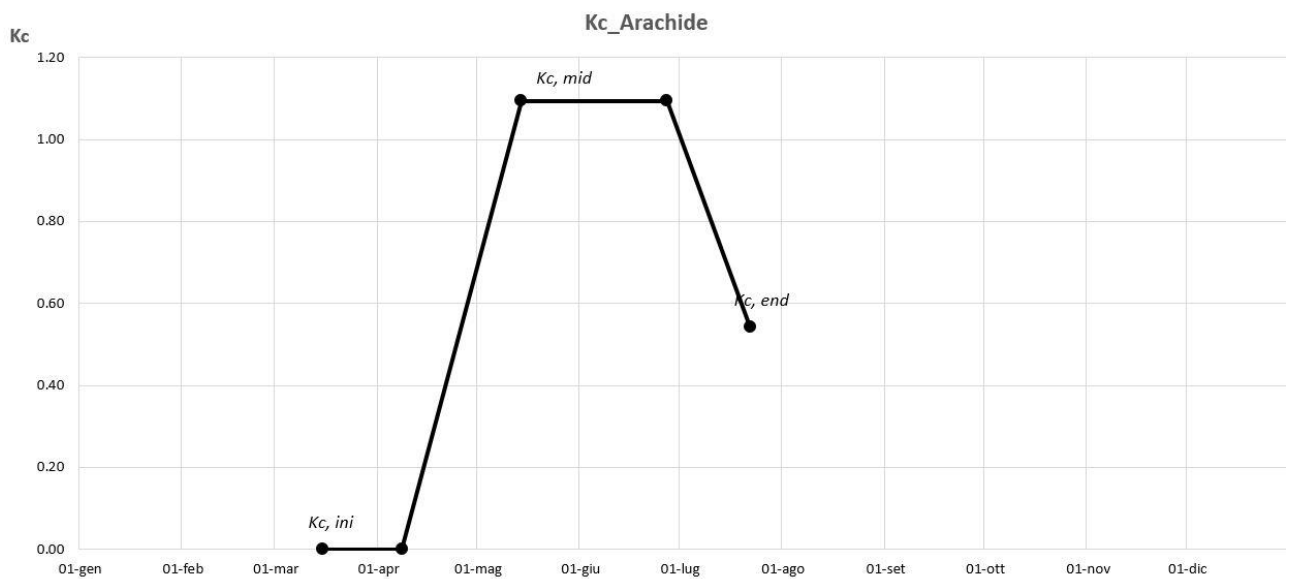


Figura 50 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per l'arachide

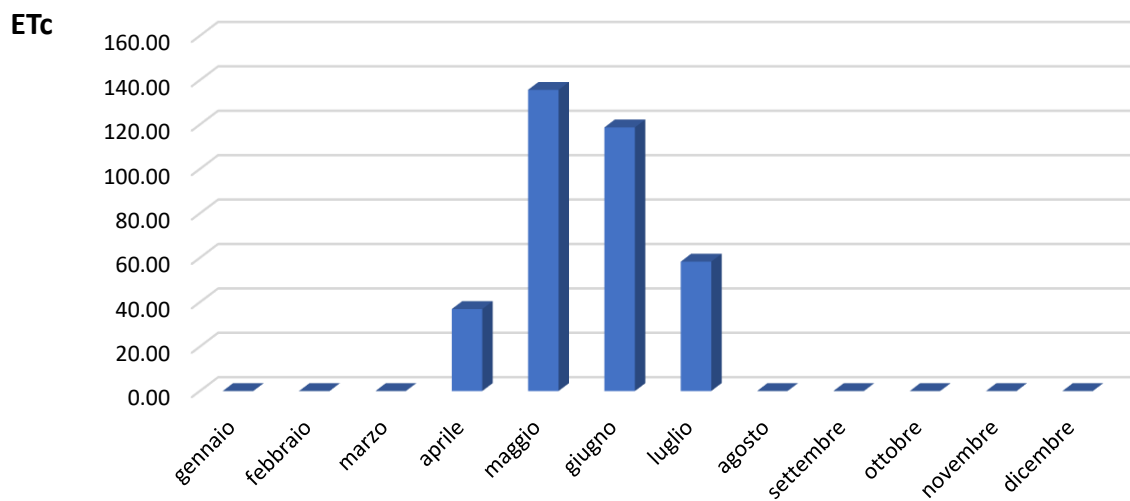


Figura 51 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per l'arachide

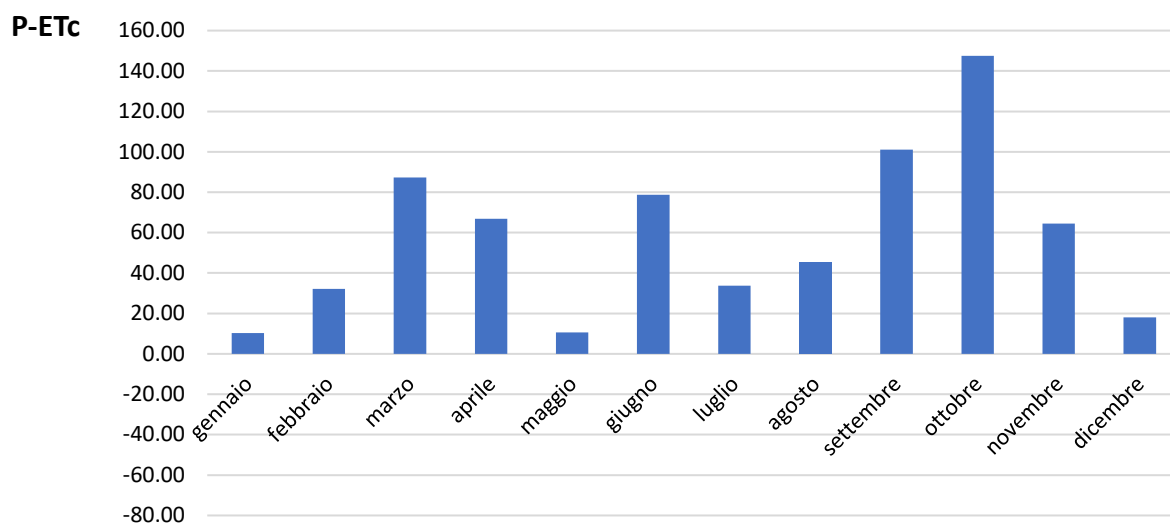


Figura 52 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per l'arachide. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.

3.3.2 Fagiolo di soia (*Glycine max*)

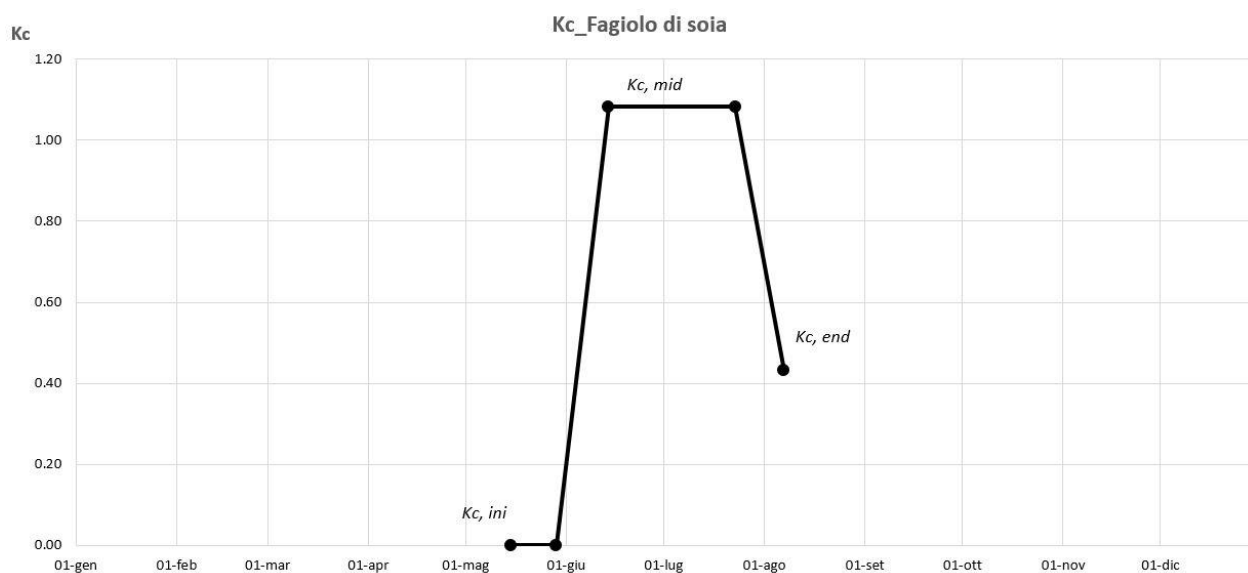


Figura 53 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale K_c per il fagiolo di soia

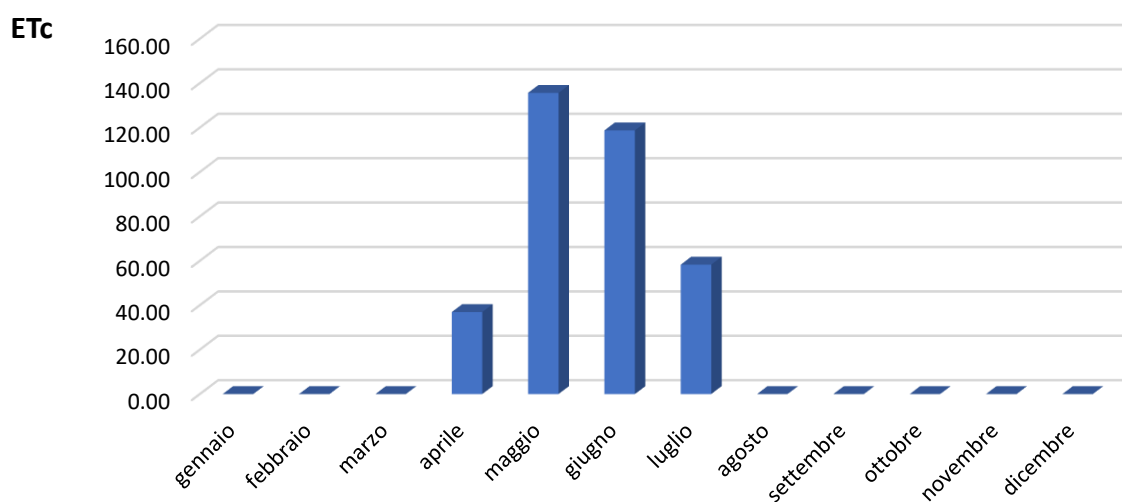


Figura 54 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ET_c per il fagiolo di soia

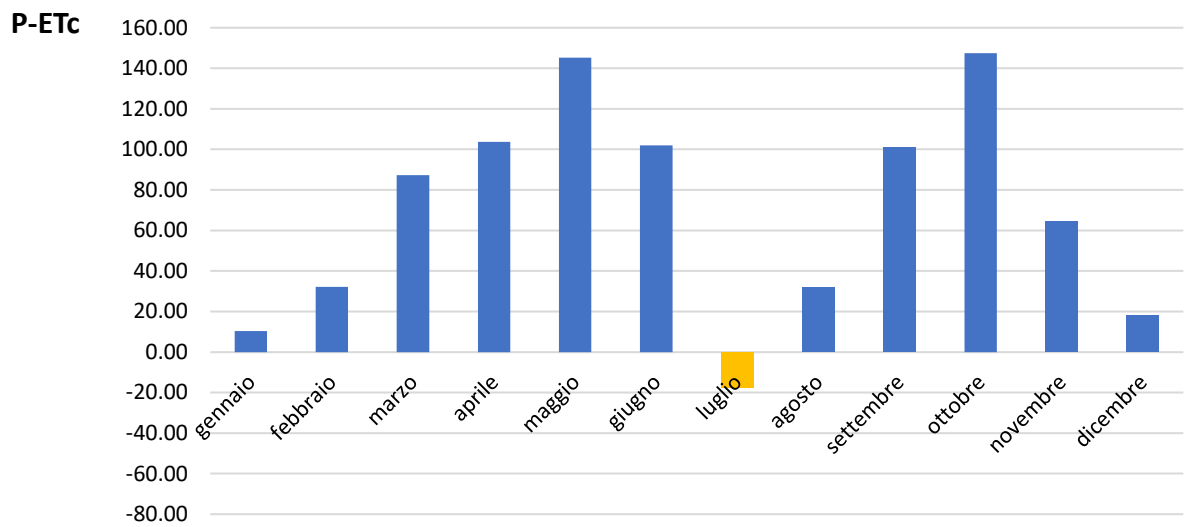


Figura 55 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il fagiolo di soia. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.

3.3.3 Fagiolo 'occhio nero' (*Vigna unguiculata*)

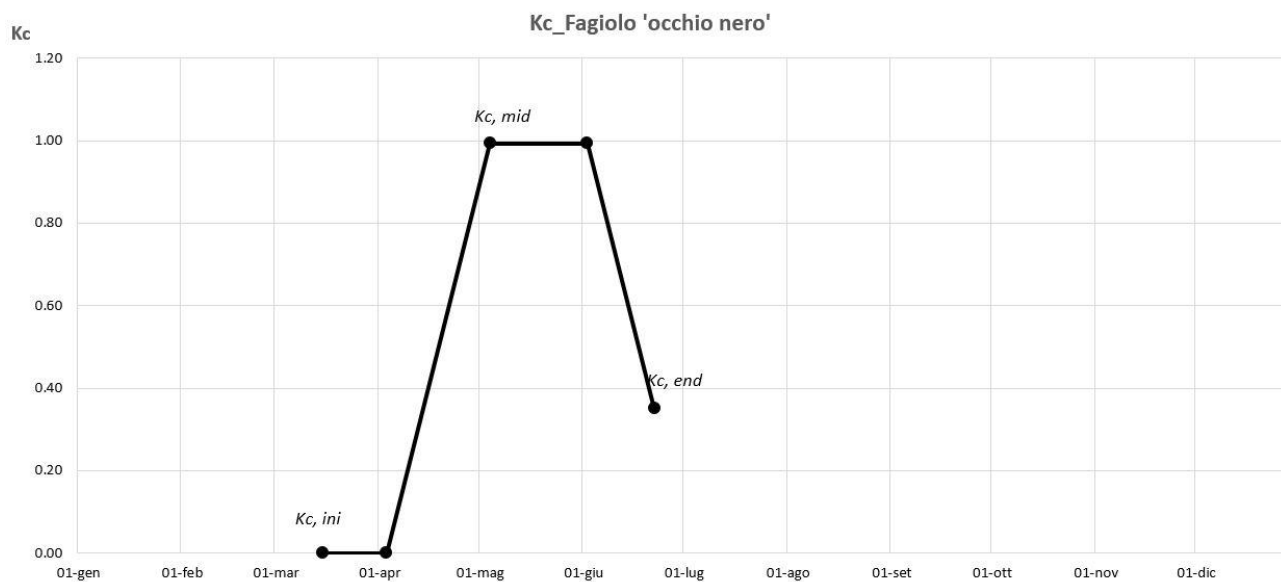


Figura 56 Variabilità intra-annuale del coefficiente culturale Kc per il fagiolo 'occhio nero'

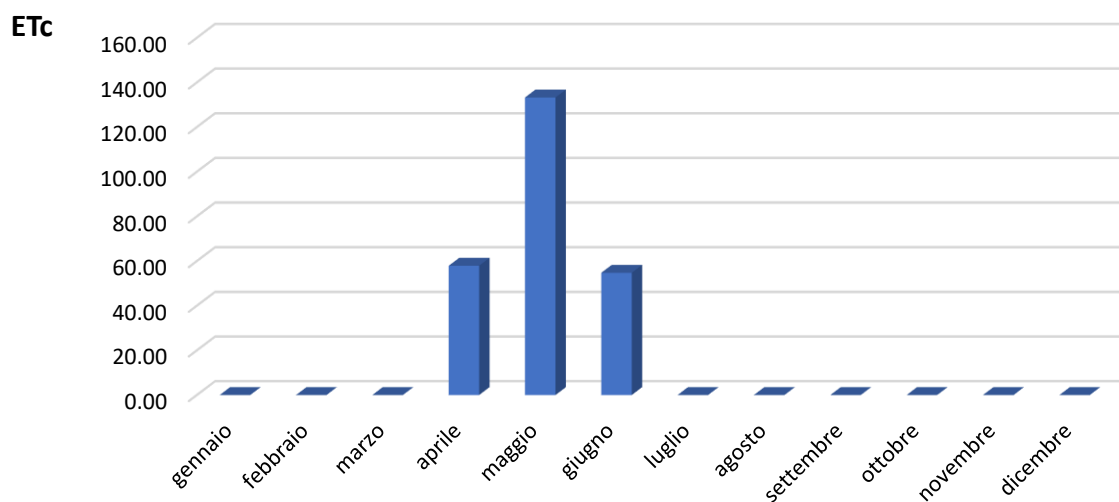


Figura 57 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il fagiolo 'occhio nero'

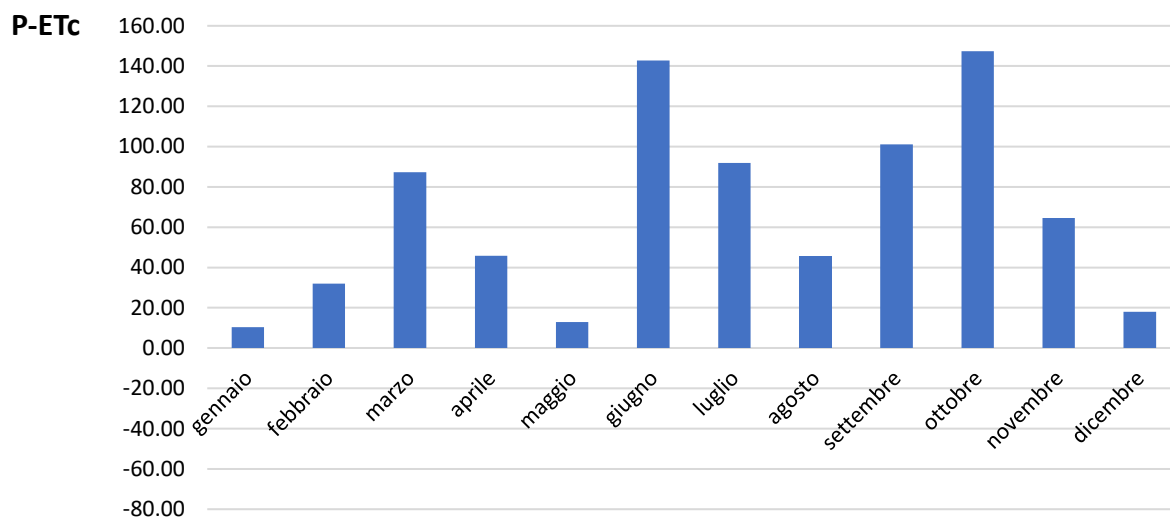


Figura 58 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il fagiolo 'occhio nero'. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.

3.3.4 Mais (*Zea mays*)

In questo caso, consultando il *Crop Calendar* della FAO si osserva che per il mais vi sono due periodi dell'anno complementari tra loro. Questo porta a pensare che nelle condizioni climatiche prese in considerazione il mais segue uno sviluppo semestrale e non annuale il che vuol dire che durante l'anno si avranno due periodi di semina (da metà marzo a metà aprile il primo e il mese di agosto il secondo), due periodi di crescita e due periodi di raccolta.

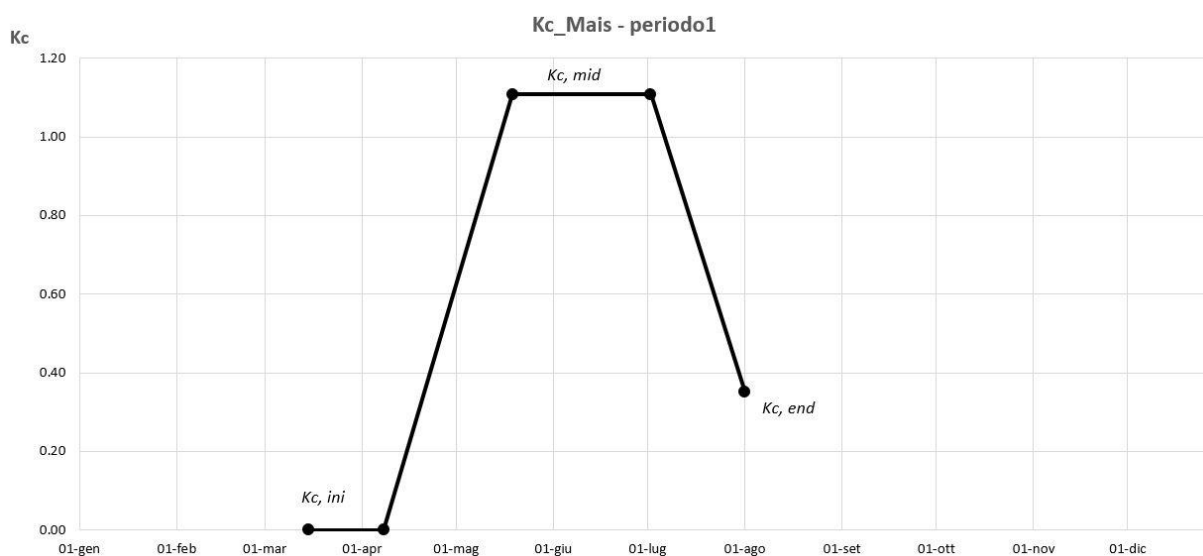


Figura 59 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per il mais per il primo periodo

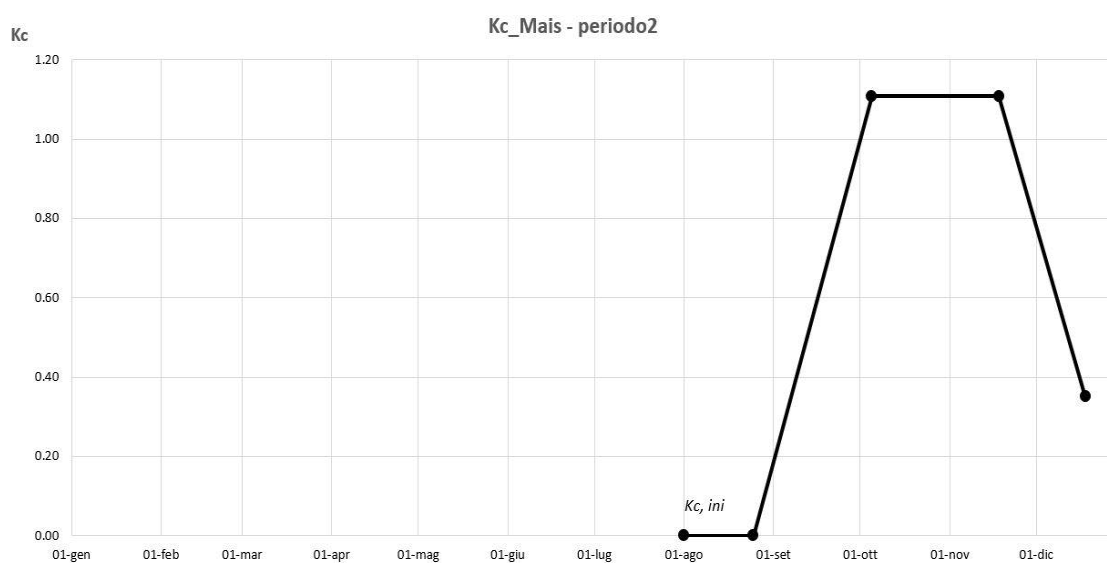


Figura 60 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per il mais per il secondo periodo

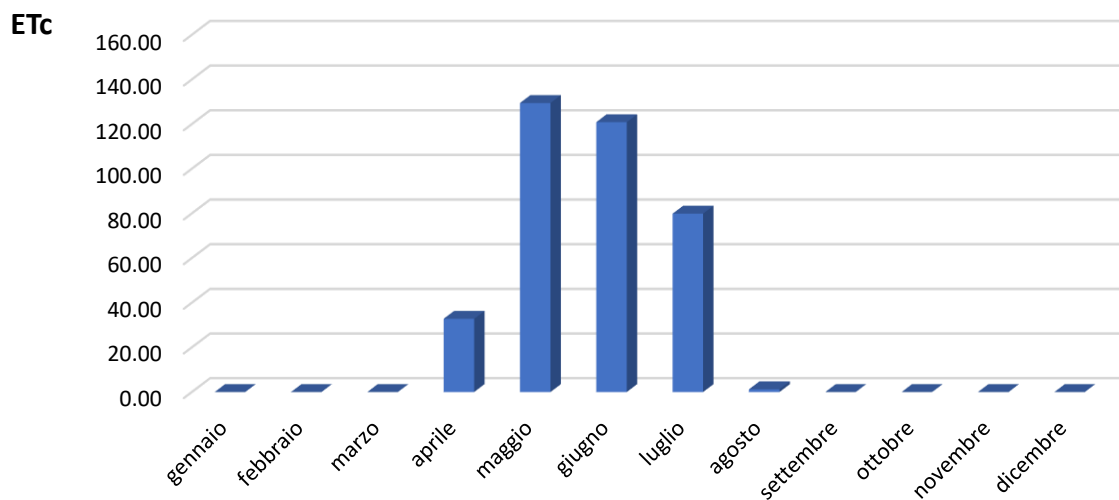


Figura 61 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il mais per il periodo 1

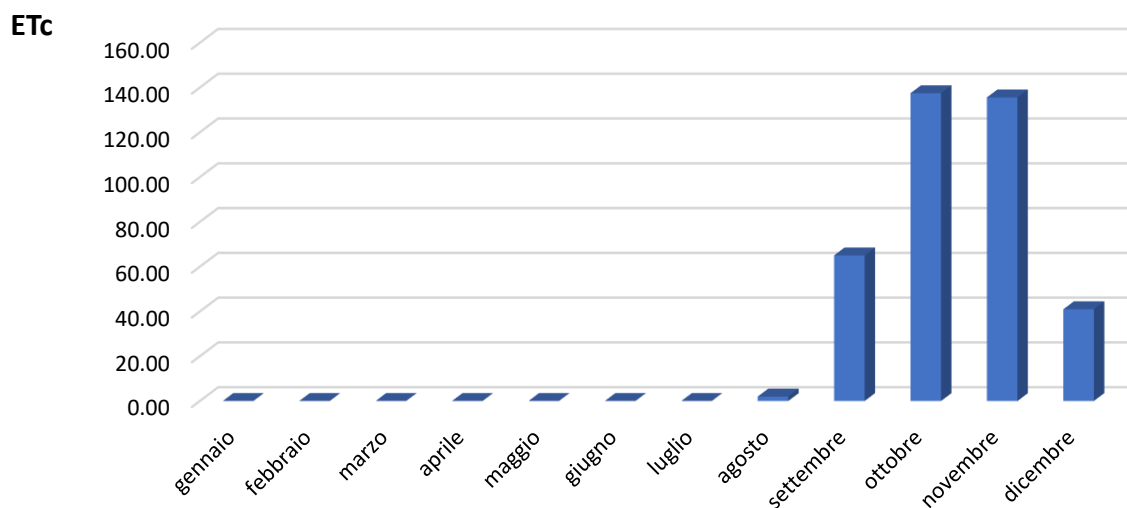


Figura 62 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il mais per il periodo 2

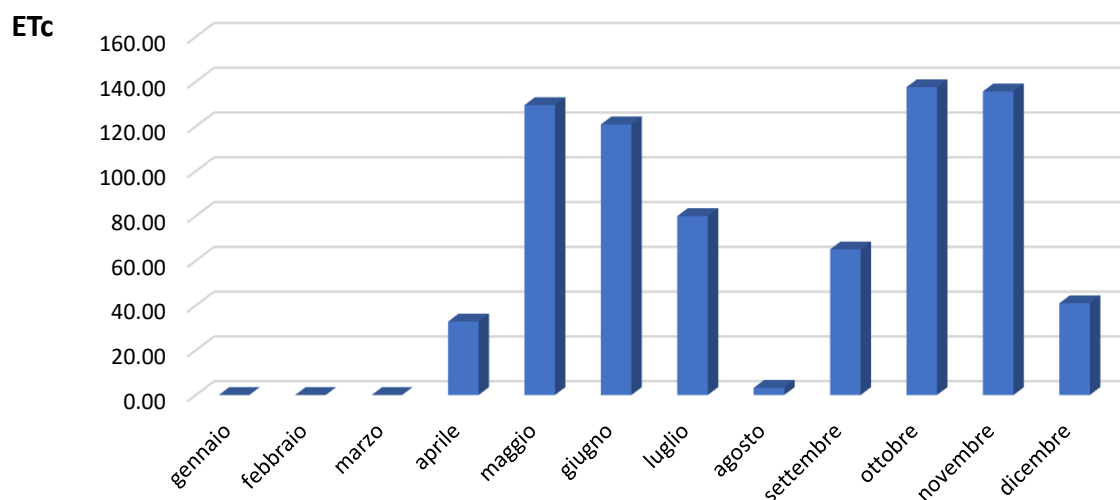


Figura 63 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il mais (valore totale)

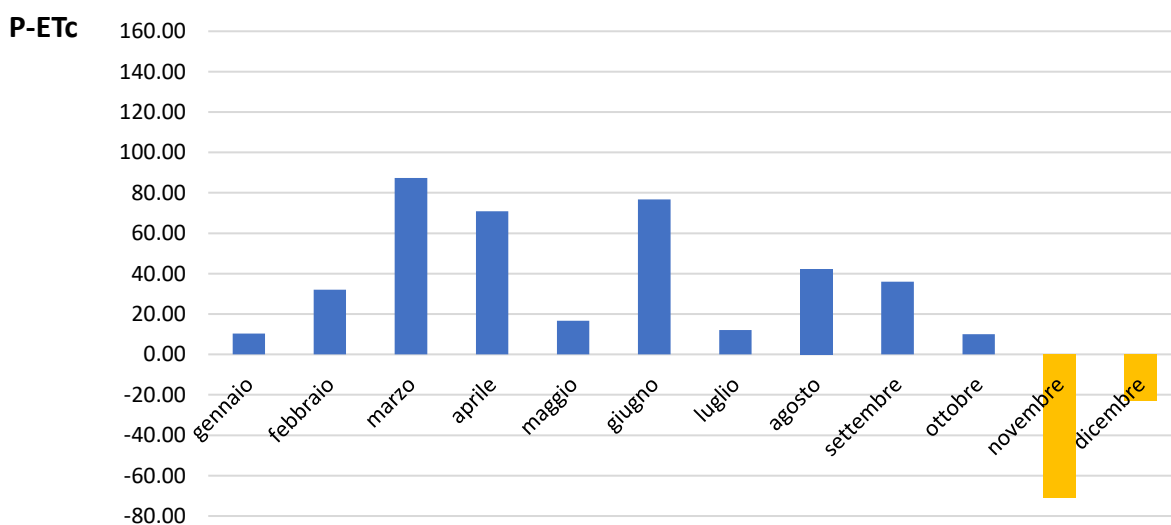


Figura 64 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il mais. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.

3.3.5 Manioca (*Manihot esculenta*)

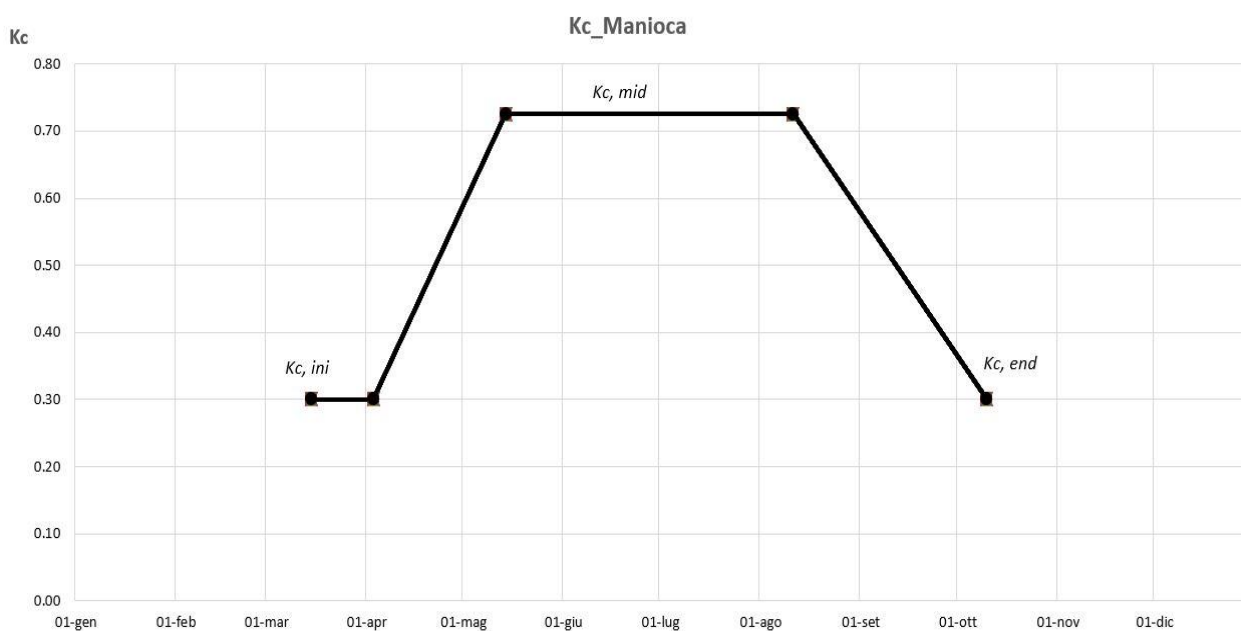


Figura 65 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per la manioca

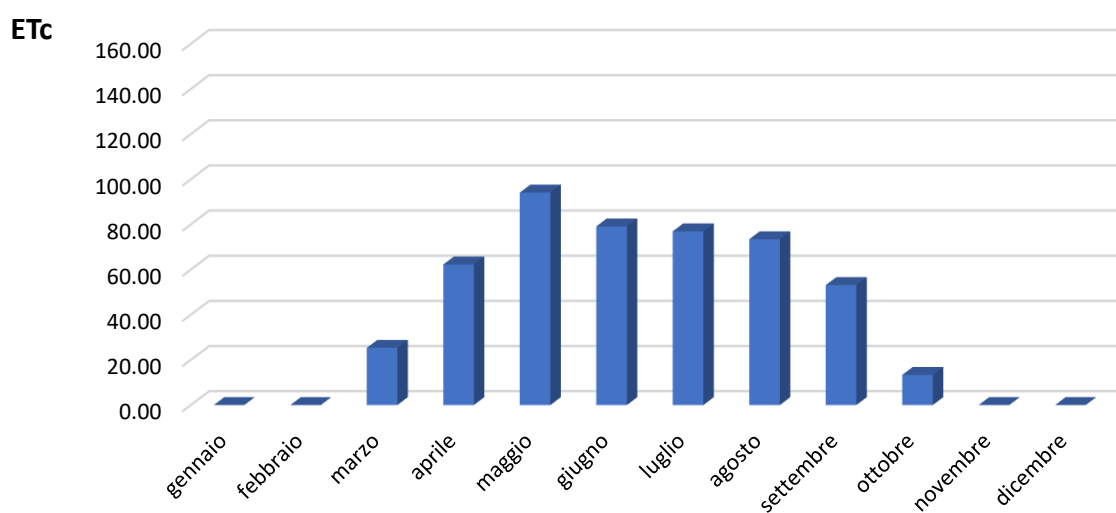


Figura 66 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per la manioca

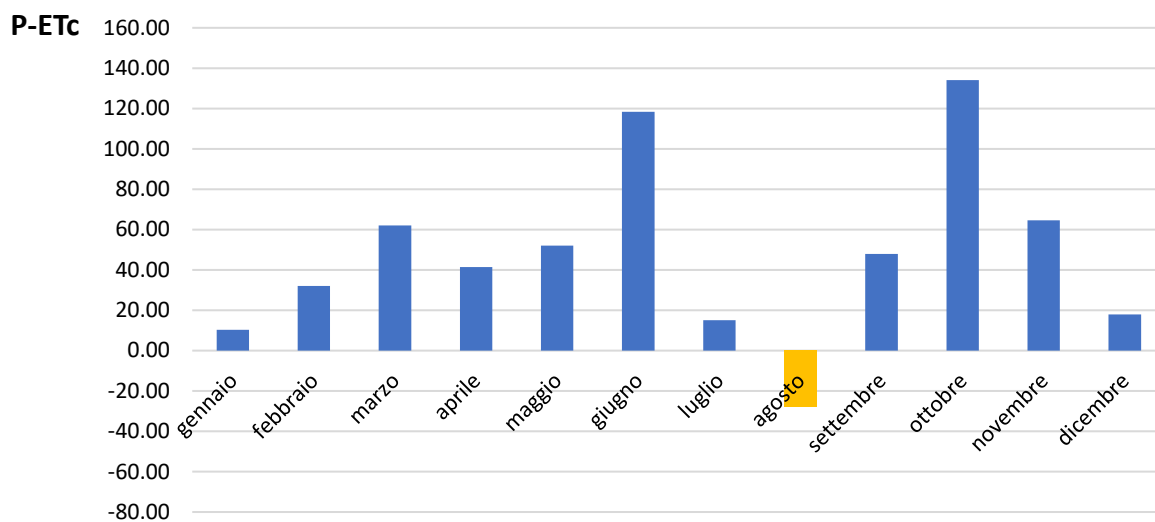


Figura 67 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per la manioca. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.

3.3.6 Patata dolce (*Ipomoea batatas*)

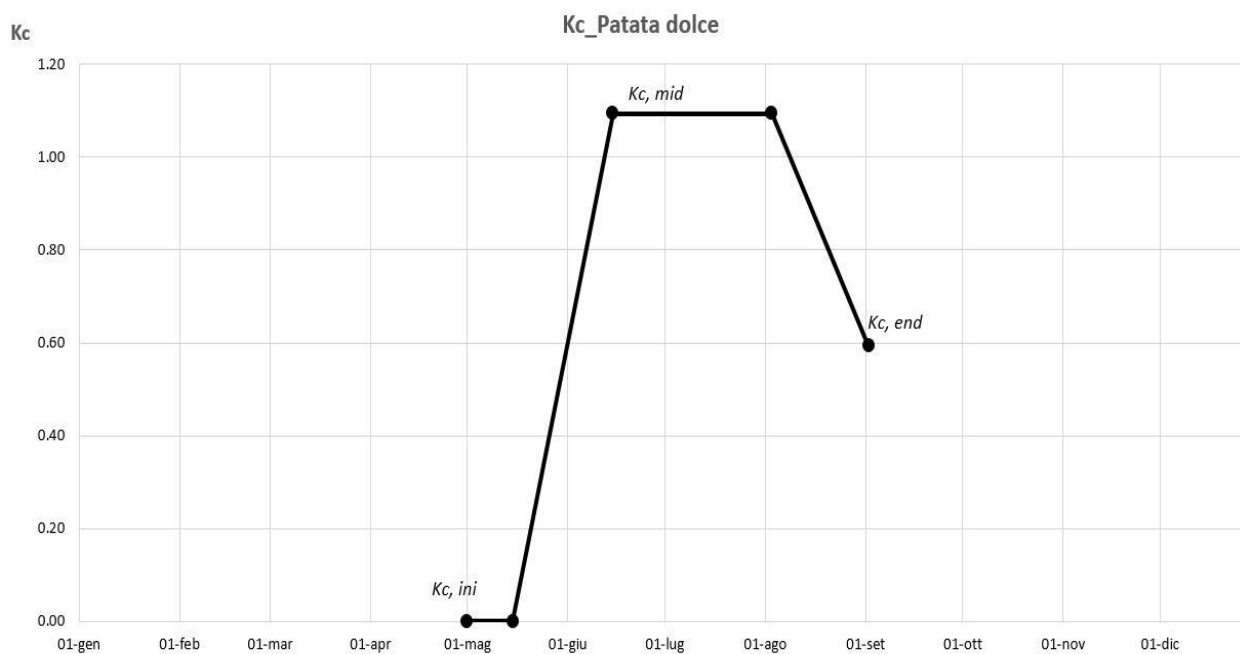


Figura 68 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per la patata dolce

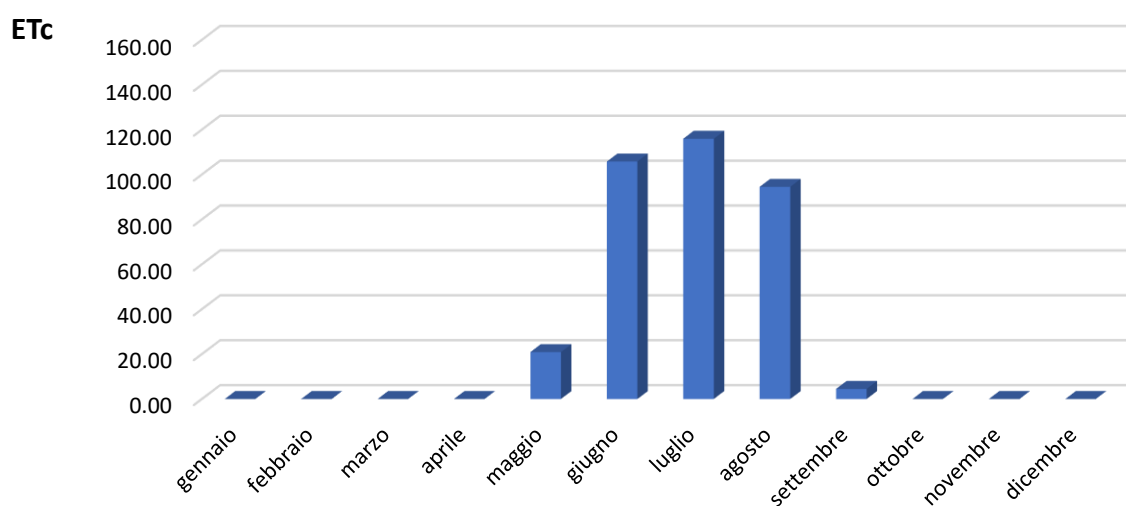


Figura 69 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per la patata dolce

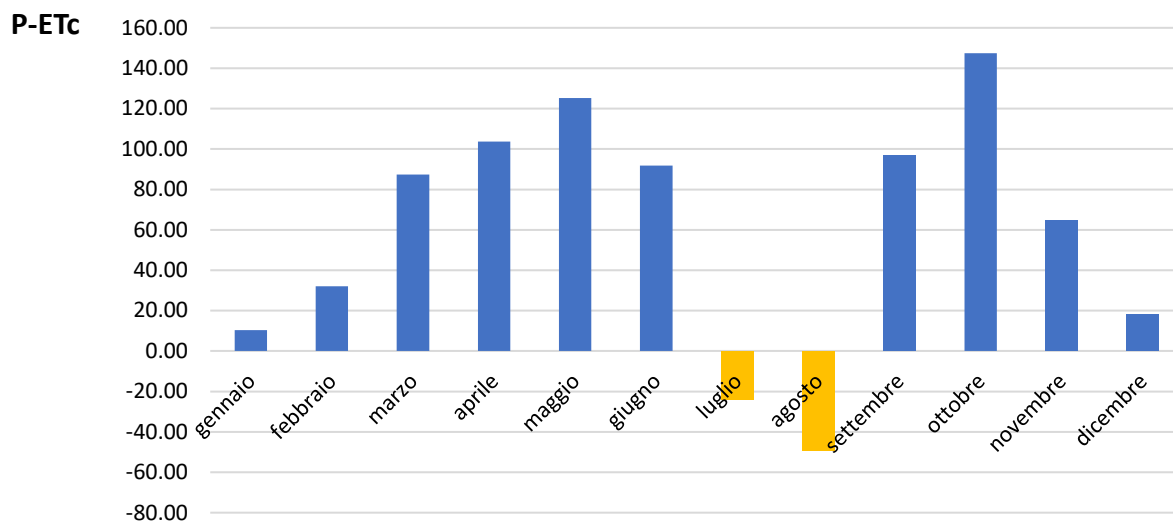


Figura 70 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per la patata dolce. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.

3.3.7 Pomodoro (*Lycopersicon esculentum*)

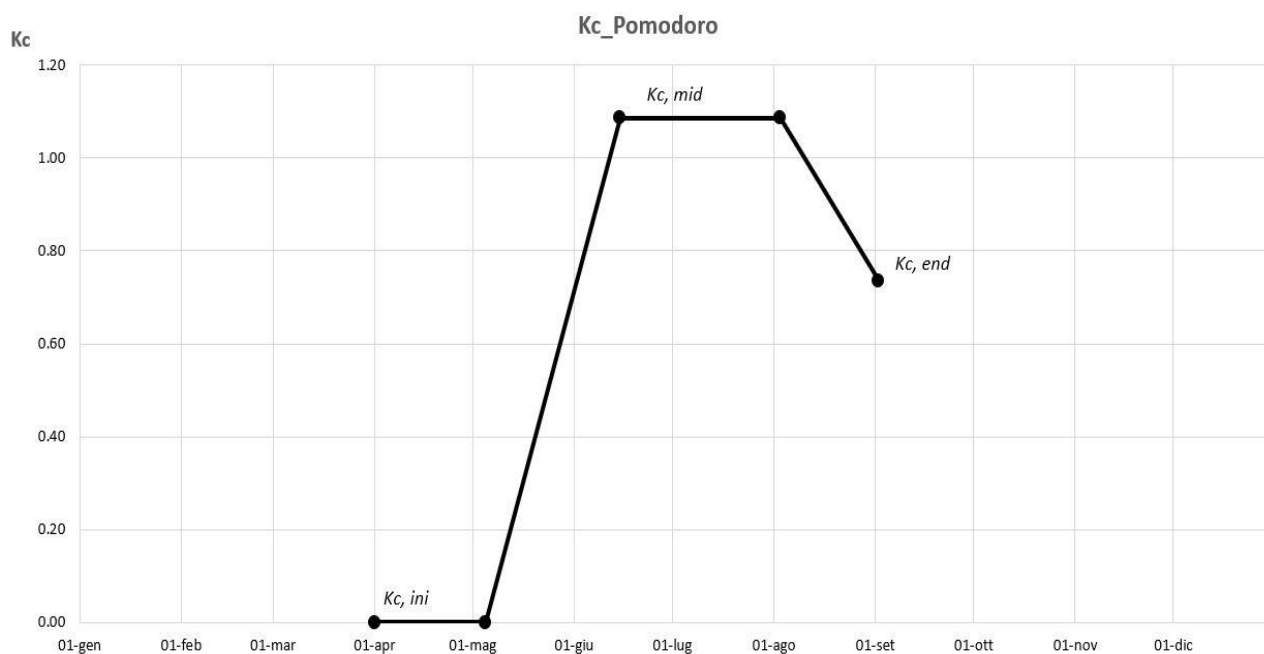


Figura 71 Variabilità intra-annuale del coefficiente culturale K_c per il pomodoro

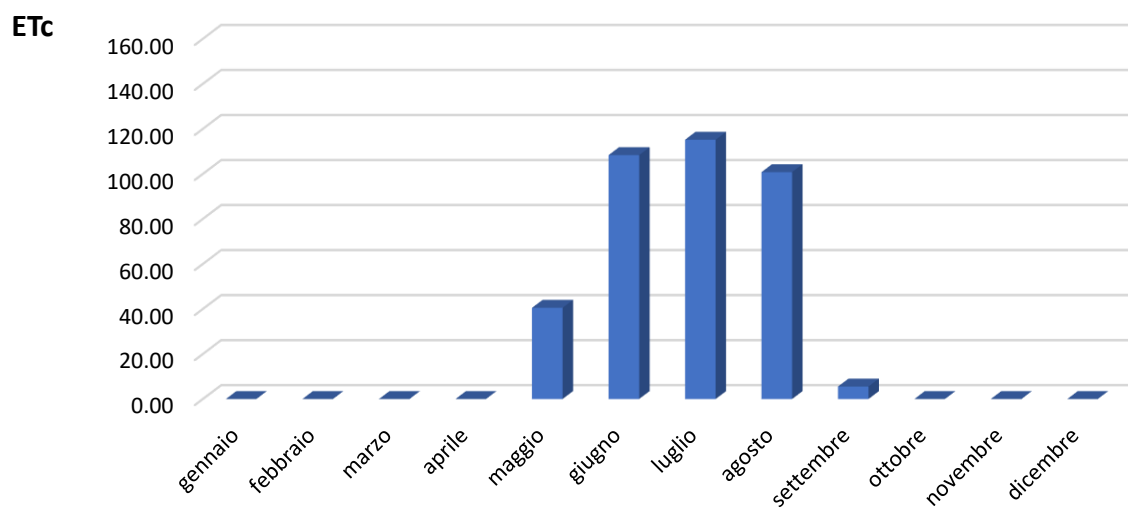


Figura 72 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ET_c per il pomodoro

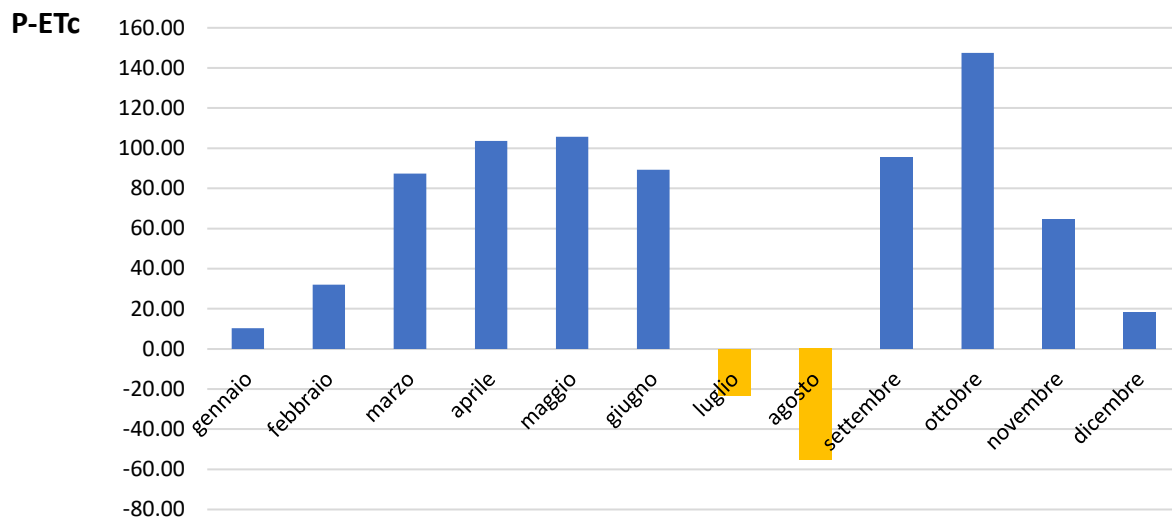


Figura 73 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il pomodoro. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.

3.3.8 Riso (*Oryza sativa*)

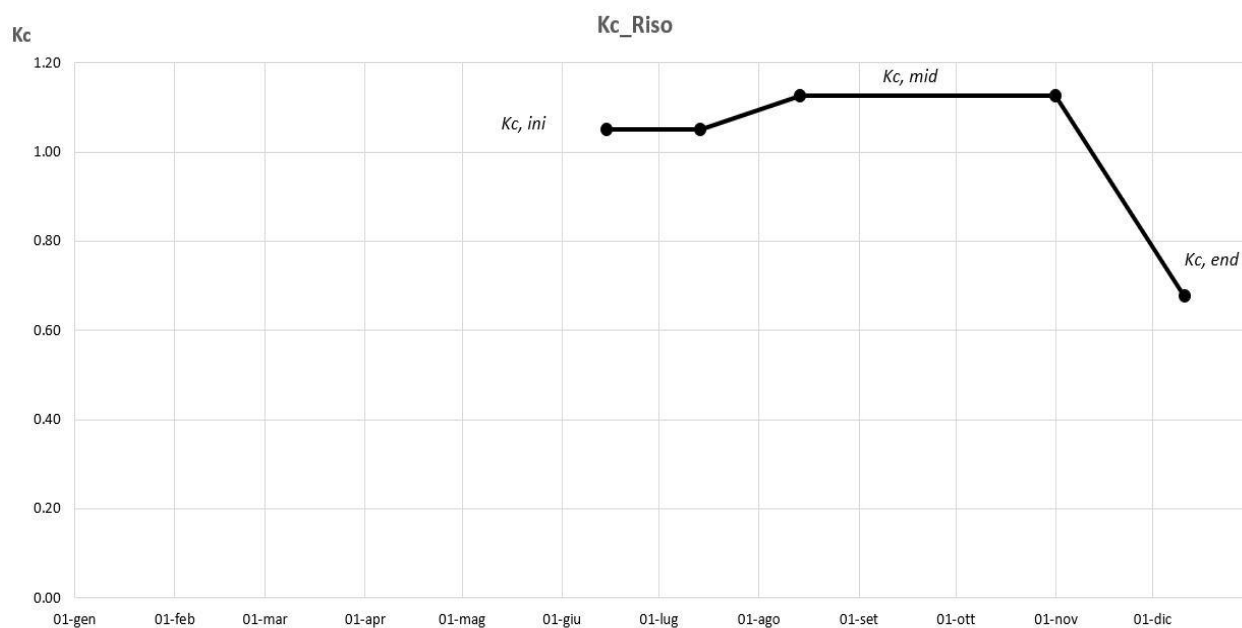


Figura 74 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per il riso

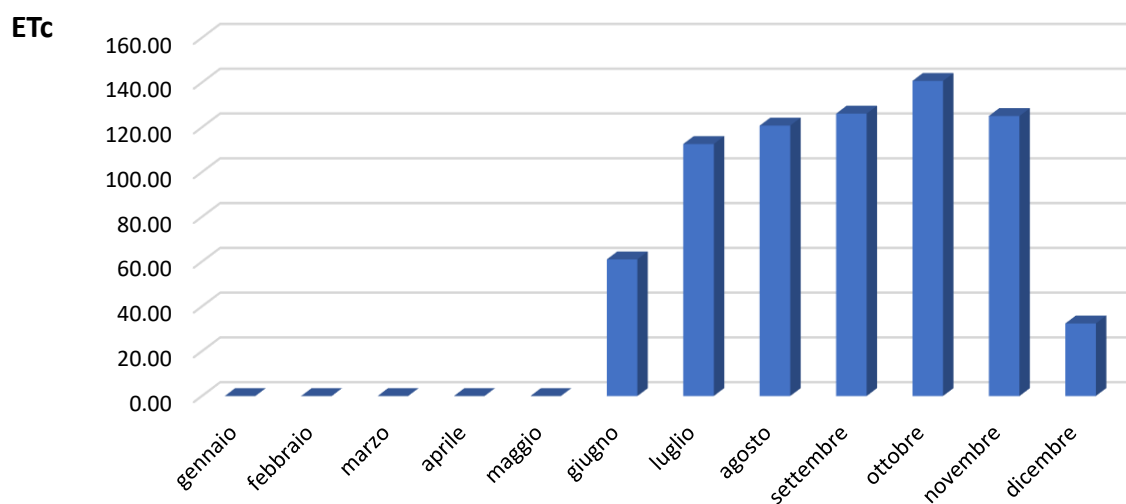


Figura 75 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il riso

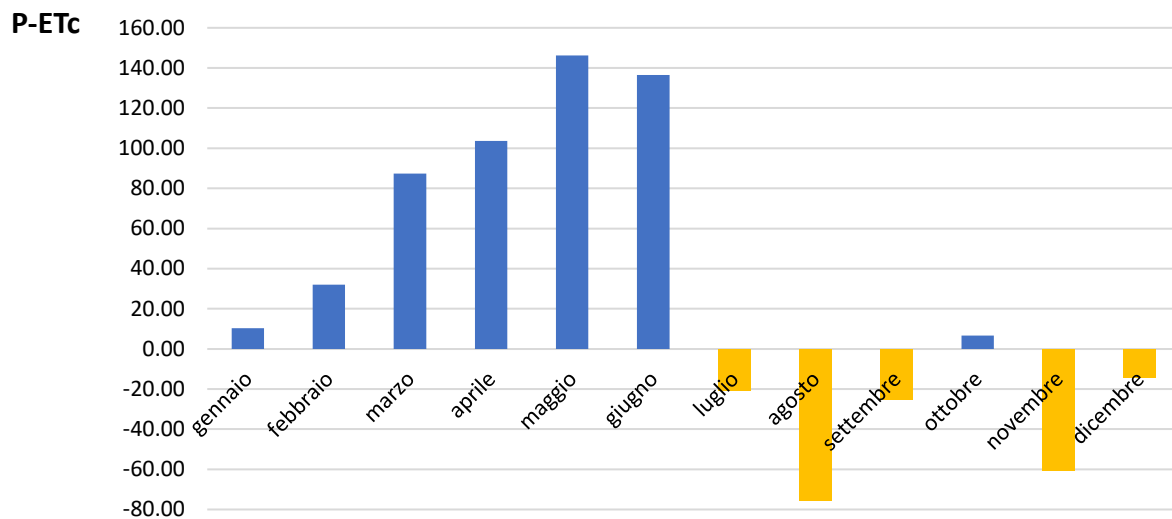


Figura 76 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il riso. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.

3.3.9 Sorgho (*Sorghum bicolor* o *sorghum vulgare*)

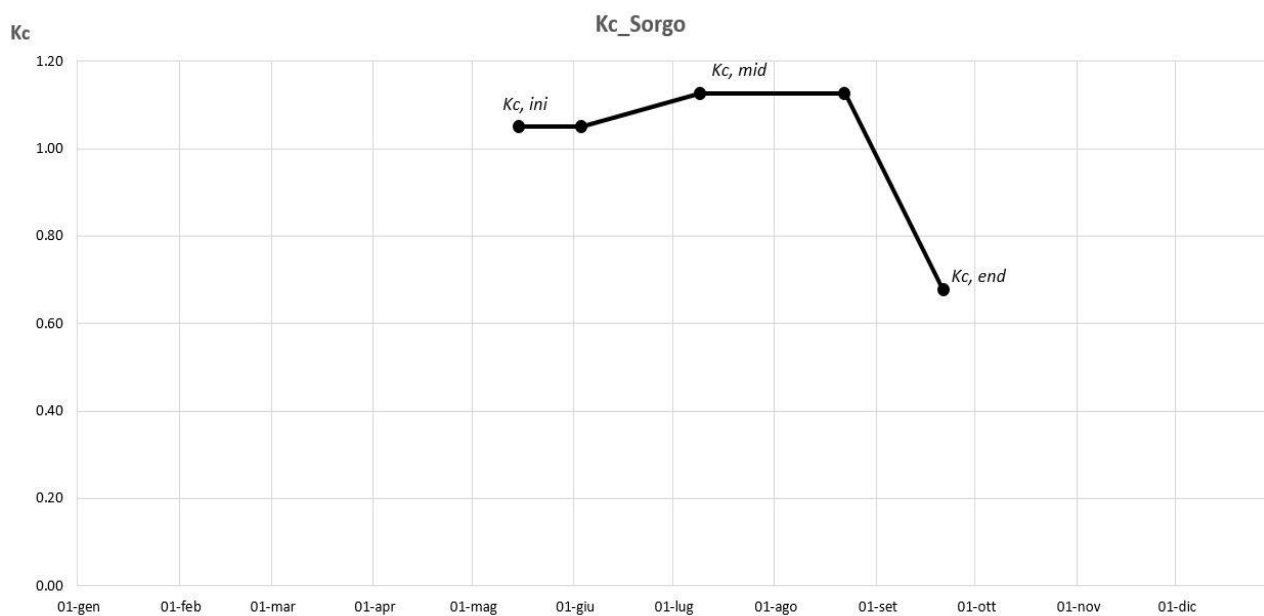


Figura 77 Variabilità intra-annuale del coefficiente colturale Kc per il sorgho

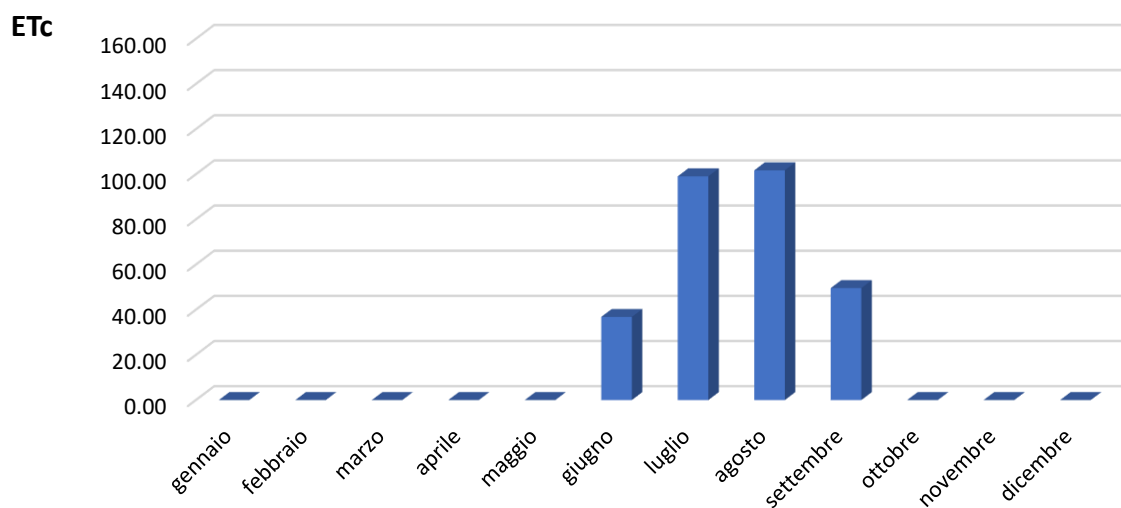


Figura 78 Variabilità intra-annuale del valore di evapotraspirazione ETc per il sorgho

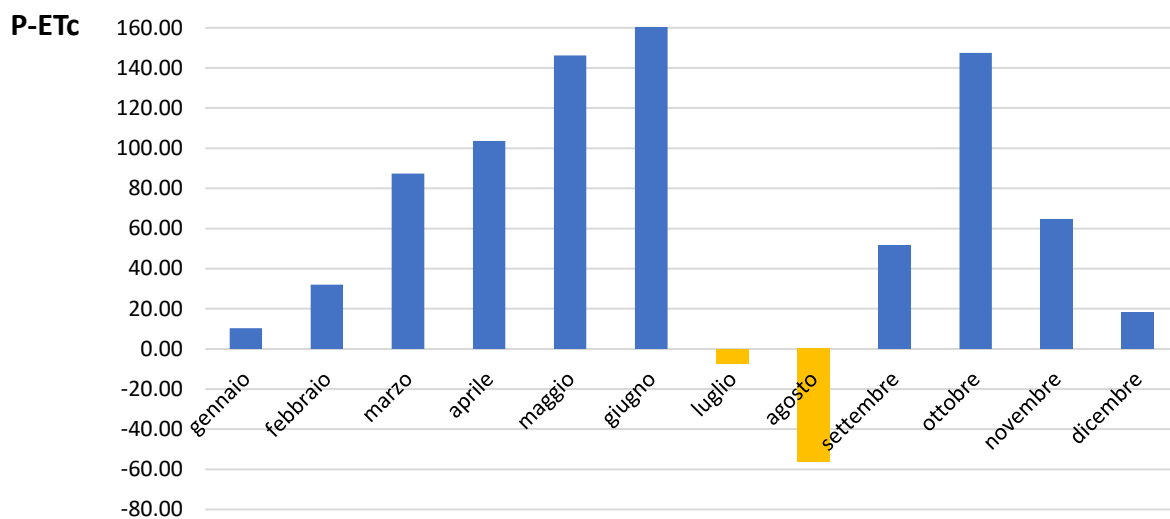


Figura 79 Variabilità intra-annuale della differenza tra precipitazioni (riferite all'anno medio) ed evapotraspirazione ETc per il sorgo. Le barre blu identificano una condizione di eccedenza di risorsa idrica disponibile per scopi irrigui, le barre gialle identificano invece una situazione di deficit irriguo.

CAPITOLO 4 – Dimensionamento di serbatoi di raccolta di acqua piovana per scopi irrigui

Lo studio effettuato sui dati di pioggia e sulla richiesta idrica delle colture permette di poter lavorare sul bilancio tra acqua in ingresso (meteorica) ed acqua in uscita (irrigazione ed eventuale evaporazione dai serbatoi).

Per far ciò si predilige un approccio basato sul fabbisogno idrico FI (equazione (14)) e non più sull'evapotraspirazione potenziale ET_c , che pure può essere considerata come un fabbisogno idrico normalizzato rispetto alla superficie. Questo cambiamento nell'approccio si traduce sostanzialmente in un cambiamento delle unità di misura. Se fino ad ora si è trattata l'intensità di pioggia, quindi i millimetri di acqua caduti ogni mese, in questo frangente si introdurranno le aree e si parlerà di volumi. Per ogni mese deve essere valida la seguente equazione:

$$V_{serbatoio} + V_{pioggia} - V_{utilizzi} - V_{evaporato\ dal\ serbatoio} \geq 0 \quad (20)$$

L'equazione (20) viene utilizzata per valutare il volume del serbatoio che andrà ad immagazzinare acqua da destinare alle colture in periodi siccitosi. Le aree in gioco sono due: la prima si estende per 13 ettari (130000 m²) e si è pensato di destinarla ad una piantagione mentre la seconda, un'area molto più piccola adiacente all'orfanotrofio, misura 250 m² e vedrà sorgere un orto. Per entrambe le aree verranno proposti diversi scenari colturali in cui cambierà la rotazione delle colture interessate e, di conseguenza, il fabbisogno idrico totale. Ciò porterà, in prima analisi, ad ipotizzare l'utilizzo di serbatoi di raccolta dell'acqua piovana e successivamente a valutare il volume necessario per il loro corretto funzionamento.

4.1 Metodologia

Il metodo seguito per valutare l'effettiva utilità dei serbatoi segue una logica unica, ma si differenzia in base al fatto che si lavori sulla piantagione (130000 m²) o sull'orto (250 m²). La prima grande distinzione da fare riguarda gli utilizzi: se per l'acqua contenuta nei serbatoi all'interno dell'area da 13 ettari l'unica destinazione è l'irrigazione, nell'area da 250 m² vi è anche una necessità di volumi d'acqua a scopo civile. Ciò comporta sicuramente un diverso

andamento della richiesta idrica: nel primo caso tale andamento è totalmente legato alle esigenze delle piante, quindi segue la stagionalità e alterna mesi a forte richiesta a mesi senza alcuna richiesta, mentre nel secondo caso il bisogno di risorsa è maggiormente distribuito in virtù di un quantitativo minimo fisso da fornire ogni mese alle utenze. Questa differenziazione si ripercuote sul processo di calcolo. Poiché il mese di gennaio, piuttosto secco, non vede mai alcuna richiesta idrica da parte delle colture prese in considerazione, nel caso della piantagione si può partire da condizione di serbatoio vuoto, aspettando che le piogge dei primi mesi dell'anno ne favoriscano il riempimento. Da quanto detto in precedenza, però, è chiaro che la stessa condizione non può valere per l'area destinata all'orto; seppur nel mese di gennaio la richiesta idrica da parte delle piante si confermi nulla, sicuramente bisogna tenere conto del volume idrico, fissato a 45 l/ab/g, destinato a utilizzi domestici. Ecco allora che si rende necessario partire da una condizione di serbatoio pieno e per far ciò si ipotizzano 5 mesi di solo riempimento (da agosto a dicembre) prima che il sistema vada a regime. Un'ultima difformità tra il caso della piantagione e quello dell'orto è rappresentata dall'area occupata dal serbatoio: esso è compreso all'interno della superficie da 13 ettari, quindi bisogna considerare l'area sottratta alle colture, mentre è esterno alla superficie da 250 m² per cui, in questo caso, l'area destinata alle colture sarà sempre pari al totale dell'area disponibile.

Al netto di tutte le differenze concettuali appena citate, il procedimento segue una linea comune: una volta scelte le n colture da introdurre (con $n=1$ per una piantagione monocoltura ed $n=9$ nel caso si vogliano usare contemporaneamente tutte le colture analizzate) si è andati ad associare alla i -esima coltivazione una certa frazione dell'area totale partendo dall'assunzione che le piogge bastino a soddisfare il FI totale dello scenario ipotizzato. Impostate le aree e note da calcoli precedenti le n ET_c mensili si perviene, rielaborando l'equazione (14), ai fabbisogni idrici mensili FI_i di ogni coltura. Per ogni mese allora si avrà:

$$FI_i = ET_{c,i} \cdot A_i \quad (21)$$

e, sommando tali contributi, al fabbisogno idrico totale mensile FI_{tot} .

$$FI_{tot} = \sum_{i=1}^n FI_i \quad (22)$$

Nel caso in cui vi sia anche una certa richiesta idrica per uso domestico, agli FI delle colture, si somma il FI_{utenze} il quale si ottiene seguendo l'equazione (23):

$$FI_{utenze} = N_{utenti} \times FI_{utenze} \left[\frac{\text{litri}}{\text{ab} \times \text{giorno}} \right] \times N_{giorni \text{ del mese}} \quad (23)$$

ovvero moltiplicando al volume idrico giornaliero destinato al singolo utente sia il numero di utenti da servire che il numero dei giorni del mese. FI_{tot} sarà allora il valore del volume (in m³) mensile richiesto dall'area coltivata e da eventuali utenze secondo lo scenario inizialmente ipotizzato. A questo punto manca il secondo termine del bilancio, ovvero quello che consente di stimare il volume che può essere apportato dalle piogge. Anche in questo caso si procede con una semplice moltiplicazione tra i mm/mese dell'anno medio stimato nel **Capitolo 2** e le aree in gioco.

$$V_{pioggia} = P_{anno \text{ medio}} \times A_i \quad (24)$$

Se tale volume risulta essere minore del volume richiesto dalle piante, allora si renderà necessario andare a immagazzinare acqua all'interno dei serbatoi. L'incognita quindi diventa il volume che è possibile immagazzinare e, com'è ovvio, questo dipende dalla dimensione del serbatoio (o dei serbatoi, a seconda che si voglia utilizzare un'unica grande superficie di raccolta o diverse superfici più piccole). Nel contempo però, se si parla di serbatoi è opportuno andare anche a considerare l'eventuale evaporazione dagli stessi e, per farlo, si sono elaborati dei dati di evaporazione reperiti su un portale della FAO chiamato WaPOR (wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1). A questo punto, noti tutti i termini del bilancio, si vanno ad impostare delle superfici del serbatoio tali da raccogliere acqua sufficiente al soddisfacimento della richiesta idrica. Per garantire la risorsa necessaria si può agire aumentando l'area del serbatoio (quindi, con serbatoio interno, contemporaneamente riducendo l'area destinata alle colture) oppure cambiando quella che è la distribuzione delle colture nell'area, cercando di favorire le colture meno esigenti nel mese in cui si segnala crisi del serbatoio. Tutto ciò deve essere fatto tenendo ben presente il criterio principale di dimensionamento, ovvero cercando di limitare quanto più possibile l'area del serbatoio (che vuol dire maggior superficie produttiva).

In sintesi, per la piantagione come per l'orto, l'obiettivo è trovare quelle combinazioni di aree che, nel caso in cui sia necessario un serbatoio, garantiscano che il volume contenuto al suo interno sia maggiore della richiesta mensile.

Gli scenari proposti e applicati a orto e piantagione sono tre, definiti in funzione della richiesta idrica delle colture analizzate, riportata in **Figura 80**:

- 1) **COLTURE POCO IDRO-ESIGENTI** (*fagiolo di soia, fagiolo 'occhio nero', sorgo*) – la prima situazione che si è ipotizzata vede coinvolte le tre colture meno esose dal punto di vista idrico ovvero il fagiolo di soia, il fagiolo 'occhio nero' e il sorgo. Vi sono mesi in cui le richieste d'acqua delle tre diverse colture si sovrappongono, ma dato che si tratta di valori piuttosto bassi questo non influisce in maniera significativa sul bilancio finale;
- 2) **COLTURE MOLTO IDRO-ESIGENTI** (*mais, manioca, pomodoro*) – escludendo il riso, si sono considerate le tre colture maggiormente bisognose d'acqua ovvero il mais, la manioca e il pomodoro. L'esclusione del riso è dovuta al fatto che questo tipo di pianta viene coltivato in monocoltura (*waterandfoodsecurity.org*). Per la combinazione di mais, pomodoro e manioca si nota che, eccetto i primi mesi, durante tutto il resto dell'anno vi sono dei valori di *ETc* medio-alti;
- 3) **MONOCOLTURA** – nonostante questo tipo di scenario sia spesso demonizzato, si è ritenuto comunque utile proporre una situazione in cui tutta l'area di coltura sia destinata ad una singola specie, la quale viene cambiata di volta in volta per poter poi effettuare un confronto finale tra le 9 colture in analisi.

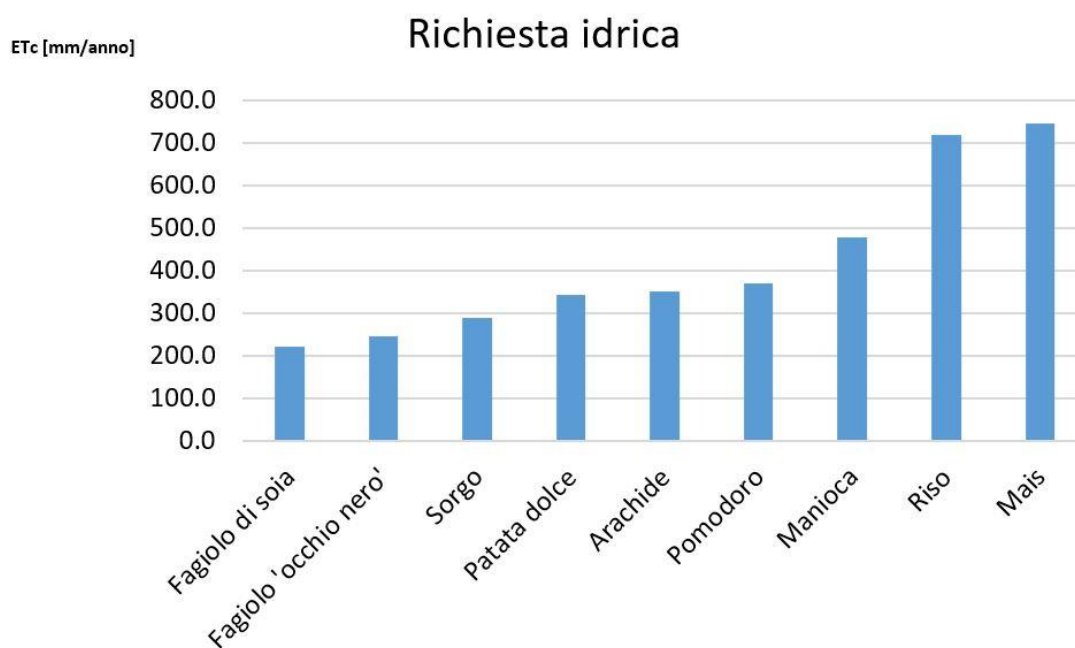


Figura 80 Istogramma ordinato della richiesta idrica delle nove colture considerate

Se per lo scenario 3 (i.e. monocoltura) basta solo far variare un'area alla volta e quindi procedere a tentativi fino al risultato migliore, stessa cosa non si può fare per gli altri due scenari. Infatti, al fine di sviluppare le operazioni atte ad ottenere tutte quelle combinazioni di aree capaci di soddisfare i criteri che sono stati stabiliti per gli scenari 1 e 2 (i.e. rispettivamente colture poco idro-esigenti e molto idro-esigenti), si è utilizzato *Matlab*. Esso è un software creato negli anni '70 che, organizzando i dati come vettori e matrici, permette l'esecuzione di procedure di calcolo anche complesse. Nell'Appendice del presente elaborato di tesi si riporta un esempio di script per il dimensionamento del serbatoio nell'area piantagione e un secondo script relativo all'orto.

Onde evitare un carico computazionale elevato, si sono scelti dei range di copertura areale per le colture definite in ciascun scenario, all'interno dei quali far variare i parametri in gioco. Generalmente la condizione che si è imposta è stata quella di garantire una certa rappresentatività della singola coltura, evitando quindi una predominanza netta di una specie sull'altra. Per l'orto, ad esempio, si è partiti da un minimo di 50 m² per ogni coltura e, di conseguenza, il massimo di ogni coltura non poteva eccedere i 150 m² essendo tre il numero di colture. Anche per i range di copertura areale delle colture previste nello scenario 1 della piantagione si è ragionato in questo modo, garantendo un minimo di 4 ettari per ogni coltura. Per quanto riguarda invece i range dello scenario 2, si è ridotta la copertura areale minima di ciascuna coltura a 3 ettari. Si deve poi sottolineare che il numero di combinazioni ottenute per ogni caso varia da un minimo per lo scenario 2 della piantagione ad un massimo per lo scenario 1 della piantagione. Questo è facilmente giustificabile ricordando che nel primo scenario vi sono le colture che richiedono meno acqua (e quindi non è difficile soddisfare la richiesta) mentre nel secondo quelle che richiedono più acqua (e quindi le combinazioni che riescono a soddisfare la richiesta sono molte di meno). Per lo scenario monocoltura, in entrambi i casi, non si sono posti dei vincoli, ma si è fatto variare di volta in volta l'area della coltura desiderata e ci si è spinti fino a trovare la combinazione area coltura-area serbatoio che garantisse il soddisfacimento delle richieste idriche e contemporaneamente consentisse il minimo ingombro superficiale possibile da parte del serbatoio. Si è partiti da valori di area di coltura relativamente bassi e, una volta verificato il funzionamento con tali settaggi, li si è aumentati fino al punto in cui un ulteriore aumento avrebbe innescato una crisi del serbatoio. Di conseguenza si è ottenuta una sola combinazione per ogni coltura, ovvero la migliore.

Quanto detto è sintetizzato in **Tabella 10** e in **Tabella 11**.

PIANTAGIONE	scenario 1 (Matlab)	scenario 2 (Matlab)	scenario 3 (Excel)
aree colture [m ²]	da 40000 a 50000 con passo 50	da 30000 a 70000 con passo 50	metodo per tentativi
area serbatoio [m ²]	da 0 a 200 con passo 50	da 0 a 500 con passo 50	metodo per tentativi
combinazioni ottenute	99505	2955	1 (migliore)

Tabella 10 Sintesi degli intervalli considerati e del numero di combinazioni ottenute nel caso della piantagione

ORTO	scenario 1 (Matlab)	scenario 2 (Matlab)	scenario 3 (Excel)
aree colture [m ²]	da 50 a 150 con passo 1	da 50 a 150 con passo 1	metodo per tentativi
area serbatoio [m ²]	da 0 a 90 con passo 1	da 0 a 90 con passo 1	metodo per tentativi
combinazioni ottenute	75461	57937	1 (migliore)

Tabella 11 Sintesi degli intervalli considerati e del numero di combinazioni ottenute nel caso dell'orto

A questo punto, vista l'impossibilità di lavorare con un numero così elevato di dati, si sono prese in esame solo 15 combinazioni (casuali, ma rappresentative di ogni valore di area del serbatoio) per i primi due scenari di piantagione e orto e, ovviamente, solo l'unica combinazione disponibile per lo scenario monocoltura. Per le combinazioni selezionate è stato calcolato l'andamento del volume nel serbatoio e l'altezza sovradimensionata in modo tale da poter avere delle indicazioni in caso di realizzazione dell'opera.

4.2 Risultati

Seguendo il procedimento descritto nei paragrafi precedenti si è arrivati a dei risultati che sono stati catalogati in tabelle. Per ogni scenario si mostrano un set di combinazioni prese ad esempio rispetto a tutte le possibili combinazioni che garantiscono il corretto approvvigionamento idrico. Si è cercato di selezionare combinazioni abbastanza differenti in modo tale da avere un quadro, seppur sintetico, completo e rappresentativo della situazione che si va a descrivere. Inoltre, sempre nell'ottica di garantire la giusta rappresentatività, i valori compresi nella colonna *Area serbatoio* sono tutti i valori che l'area del serbatoio può avere nei range specificati nelle tabelle precedenti.

Una volta definite le combinazioni in analisi, si introduce una seconda tabella che rappresenta l'andamento mensile dei volumi all'interno del serbatoio. Questo, che viene fatto per ognuna delle 15 combinazioni prese come riferimento, porta a delle valutazioni in merito al dimensionamento dello stesso serbatoio. Viene evidenziato il valore di volume massimo che si raggiunge per ogni combinazione di aree e, nota l'area del serbatoio fissata inizialmente, si perviene facilmente alla misura dell'altezza. È buona regola poi, specialmente se si sta lavorando con dati medi, lasciare un certo margine di tolleranza nel dimensionamento. Visto e

considerato che avrebbe poco senso sovradimensionare leggermente la superficie del serbatoio perché andrebbe ad impattare sui fabbisogni idrici e, di riflesso, sui calcoli, per impostare un margine di sicurezza si sovradimensiona l'altezza di un 20%, considerando così una eventuale oscillazione dei valori stimati.

4.2.1 Scenario 1, colture poco idro-esigenti – Piantagione

In questo scenario le colture scelte sono il fagiolo di soia, il fagiolo 'occhio nero' e il sorgo. La prima è una pianta coltivata sin dall'antichità e, attualmente, molto diffusa perché facile da coltivare, redditizia e utile a migliorare la fertilità del terreno (*Treccani*). Appartiene alla famiglia delle *Fabacee*, così come il fagiolo 'occhio nero'. Anch'esso, proveniente proprio dall'Africa occidentale, ha degli effetti positivi sul terreno. In ultimo il sorgo, appartenente alla famiglia delle *Graminacee*, riveste una certa importanza nell'economia dei paesi africani e asiatici.

	Area fagiolo di soia [m ²]	Area fagiolo 'occhio nero' [m ²]	Area sorgo [m ²]	Area serbatoio [m ²]
1	40000	40000	50000	0
2	42950	40550	46500	0
3	50000	40000	40000	0
4	40350	44000	45600	50
5	42000	42100	45850	50
6	47550	42350	40050	50
7	42950	42400	44550	100
8	43700	46050	40150	100
9	45300	43050	41550	100
10	40100	44300	45450	150
11	47150	41750	40950	150
12	49000	40800	40050	150
13	42800	40550	46450	200
14	43050	46500	40250	200
15	47050	40750	42000	200

Tabella 12 Set di combinazioni prese ad esempio per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, piantagione

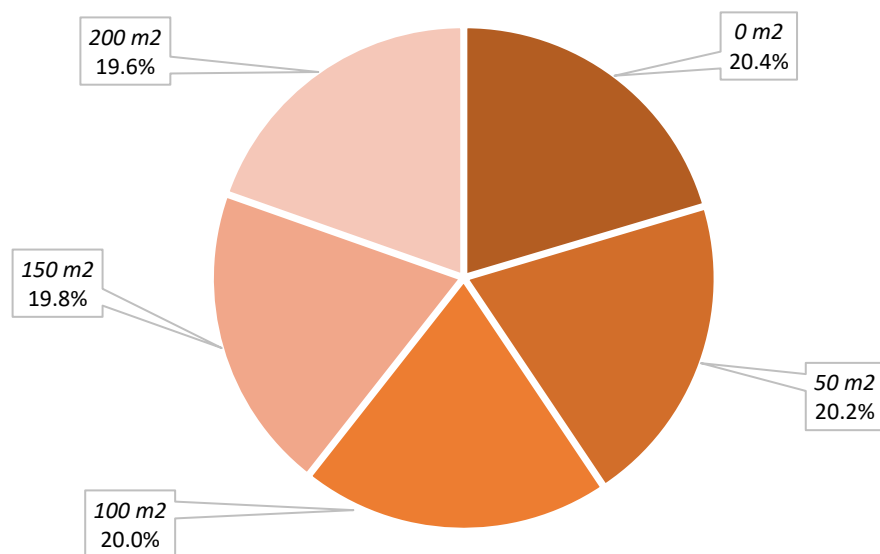


Figura 81 Grafico a torta che descrive la distribuzione percentuale delle combinazioni in base al relativo valore d'area del serbatoio per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, piantagione

Da **Figura 81** si evince come le combinazioni che sono state ritenute valide siano distribuite in maniera abbastanza equa tra i 5 valori di area del serbatoio presenti nell'osservazione. Tale risultato è giustificato dal fatto che per colture poco idro-esigenti l'influenza di un serbatoio è molto limitata; poiché le colture riescono più o meno a sostenersi con la sola acqua di precipitazione diretta, allora la presenza di un serbatoio non è così determinante da mostrare una prevalenza di un valore d'area rispetto ad un altro. Evidentemente il numero di combinazioni che permettono il funzionamento è vicino al numero totale di combinazioni possibili e, coi range imposti (**Tabella 10**), le combinazioni associate ai diversi valori di area sono numericamente molto simili. Da sottolineare poi come vi sia un 20.4% di combinazioni per le quali non sia necessario il serbatoio.

Quanto visto è coerente anche per quanto ricavato per l'orto e riassunto in **Figura 82**. L'unica differenza presente è che, in quest'ultimo caso, sono stati presi 3 intervalli di valori. Inoltre, si nota come per l'orto non vi siano combinazioni possibili senza serbatoio e ciò avviene a causa dell'utilizzo civile al quale è destinato parte del volume stoccato.

	VOLUMI NEL SERBATOIO [m ³]														
seriale combinazione	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
gen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
feb	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8
mar	0.0	0.0	0.0	3.2	3.2	3.2	6.5	6.5	6.5	9.7	9.7	9.7	13.0	13.0	13.0
apr	0.0	0.0	0.0	7.4	7.4	7.4	14.8	14.8	14.8	22.2	22.2	22.2	29.5	29.5	29.5
mag	0.0	0.0	0.0	13.7	13.7	13.7	27.4	27.4	27.4	41.1	41.1	41.1	54.9	54.9	54.9
giu	0.0	0.0	0.0	22.8	22.8	22.8	45.6	45.6	45.6	68.5	68.5	68.5	91.3	91.3	91.3
lug	0.0	0.0	0.0	26.7	26.7	26.7	53.4	53.4	53.4	80.1	80.1	80.1	106.7	106.7	106.7
ago	0.0	0.0	0.0	28.2	28.2	28.2	56.4	56.4	56.4	84.7	84.7	84.7	112.9	112.9	112.9
set	0.0	0.0	0.0	32.5	32.5	32.5	65.1	65.1	65.1	97.6	97.6	97.6	130.2	130.2	130.2
ott	0.0	0.0	0.0	39.0	39.0	39.0	78.0	78.0	78.0	117.1	117.1	117.1	156.1	156.1	156.1
nov	0.0	0.0	0.0	41.0	41.0	41.0	82.1	82.1	82.1	123.1	123.1	123.1	164.2	164.2	164.2
dic	0.0	0.0	0.0	40.4	40.4	40.4	80.8	80.8	80.8	121.2	121.2	121.2	161.6	161.6	161.6

V massimo [m ³]	0.0	0.0	0.0	41.0	41.0	41.0	82.1	82.1	82.1	123.1	123.1	123.1	164.2	164.2	164.2
A serbatoio [m ²]	0	0	0	50	50	50	100	100	100	150	150	150	200	200	200
Altezza serbatoio [m]				0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
Altezza di sicurezza [m]				0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

Tabella 13 Volumi mensili nel serbatoio e dimensionamento dello stesso per ogni combinazione in analisi per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, piantagione

I risultati ottenuti in questo caso suggeriscono una riflessione, infatti salta immediatamente all'occhio che le colonne dei volumi relative allo stesso valore di *A serbatoio* sono identiche. Ciò può essere spiegato andando all'origine del processo di calcolo: si è impostata una variazione dell'area del serbatoio in modo tale da avere più casi possibili da esaminare (**Tabella 12**), ma in realtà, dato che le colture sono molto poco esigenti, in genere bastano le sole piogge a soddisfare il loro fabbisogno idrico determinando una richiesta di irrigazione aggiuntiva nulla. La conseguenza di ciò è che, volendo introdurre un serbatoio, il livello al suo interno sarà dipendente unicamente dalle piogge e dalle evaporazioni in quanto il termine relativo all'acqua per l'irrigazione è nullo. Essendo i dati di pioggia ed irrigazione dei valori medi e totalmente indipendenti dalle colture o dalle aree a loro destinate, ecco che diventa chiaro il risultato esplicitato in **Tabella 13**.

Quello che si ottiene alla fine è un serbatoio con identica altezza in ognuno dei 15 casi. Quella che cambia (perché è stata fatta cambiare volutamente) è la superficie del serbatoio il cui aumento determina anche un aumento del volume massimo nel serbatoio. Quanto appena detto conferma che, in questo particolare caso in cui il fabbisogno idrico delle piante è interamente coperto dalle piogge, ad area maggiore corrisponde maggiore captazione d'acqua e quindi, non essendoci irrigazione, maggiore volume. Le combinazioni dello scenario 1 indicate coi seriali 1, 2 e 3 rappresentano perciò il caso migliore per la piantagione, ovvero quello in cui non c'è bisogno di alcun serbatoio.

4.2.2 Scenario 1, colture poco idro-esigenti – Orto

	Area fagiolo di soia [m ²]	Area fagiolo 'occhio nero' [m ²]	Area sorgo [m ²]	Area serbatoio [m ²]
1	50	93	107	76
2	119	64	67	77
3	95	102	53	78
4	57	64	129	79
5	89	109	52	80
6	113	54	83	81
7	53	87	110	82
8	85	115	50	83
9	51	68	131	84
10	145	52	53	85
11	72	106	72	86
12	58	139	53	87
13	68	80	102	88
14	112	59	79	89
15	73	60	117	90

Tabella 14 Set di combinazioni prese ad esempio per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, orto

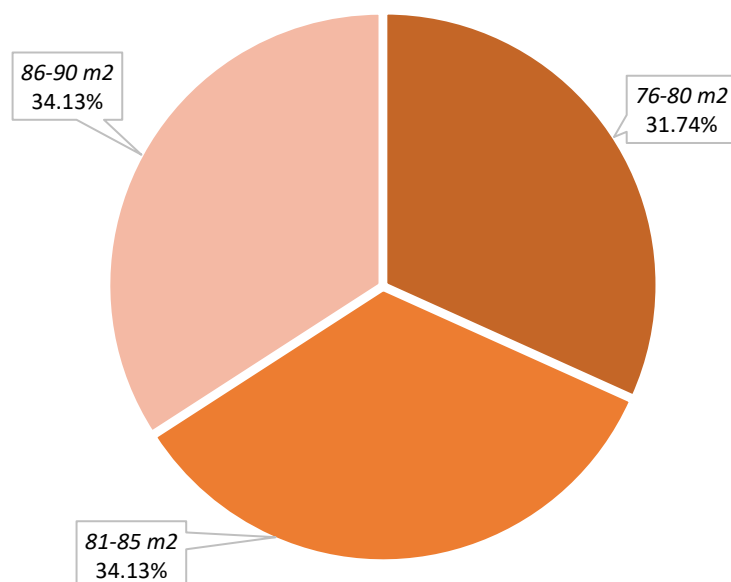


Figura 82 Grafico a torta che descrive la distribuzione percentuale delle combinazioni in base al relativo range di valori d'area del serbatoio per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, orto

	VOLUMI NEL SERBATOIO [m ³]														
seriale combinazione	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ago (solo riempimento)	39.1	39.1	39.2	39.2	39.2	39.3	39.3	39.3	39.4	39.4	39.4	39.4	39.5	39.5	39.5
set (solo riempimento)	127.6	127.7	127.8	127.9	128.0	128.2	128.3	128.4	128.5	128.6	128.8	128.9	129.0	129.1	129.2
ott (solo riempimento)	256.9	257.1	257.4	257.6	257.9	258.1	258.4	258.6	258.9	259.1	259.4	259.6	259.9	260.1	260.4
nov (solo riempimento)	312.2	312.5	312.8	313.1	313.4	313.7	314.0	314.2	314.5	314.8	315.1	315.4	315.7	316.0	316.3
dic (solo riempimento)	325.8	326.1	326.4	326.7	326.9	327.2	327.5	327.8	328.0	328.3	328.6	328.9	329.1	329.4	329.7
gen	227.8	228.1	228.3	228.6	228.8	229.1	229.3	229.6	229.9	230.1	230.4	230.6	230.9	231.1	231.4
feb	159.6	159.9	160.1	160.4	160.6	160.9	161.2	161.4	161.7	161.9	162.2	162.4	162.7	163.0	163.2
mar	130.4	130.7	131.0	131.3	131.6	131.9	132.3	132.6	132.9	133.2	133.5	133.8	134.2	134.5	134.8
apr	119.4	119.8	120.2	120.6	121.0	121.4	121.8	122.2	122.6	123.0	123.4	123.8	124.2	124.6	125.0
mag	142.8	143.3	143.9	144.4	144.9	145.4	146.0	146.5	147.0	147.6	148.1	148.6	149.1	149.7	150.2
giu	215.4	216.1	216.8	217.5	218.2	218.9	219.6	220.3	221.0	221.7	222.5	223.2	223.9	224.6	225.3
lug	191.1	191.9	192.7	193.5	194.3	195.1	195.9	196.6	197.4	198.2	199.0	199.8	200.6	201.4	202.1
ago	125.4	126.4	127.3	125.5	128.9	129.7	130.0	131.3	129.5	133.0	133.8	134.6	135.4	136.2	135.5
set	112.6	113.7	114.7	113.0	116.5	117.4	117.7	119.2	117.4	121.0	121.9	122.8	123.7	124.6	123.9
ott	137.3	138.6	139.6	138.1	141.7	142.7	143.2	144.8	143.1	146.8	147.9	148.9	149.9	151.0	150.4
nov	91.4	92.7	93.8	92.3	95.9	97.0	97.5	99.1	97.5	101.3	102.3	103.4	104.5	105.6	105.1
dic	0.4	1.7	2.7	1.2	4.8	5.9	6.4	8.0	6.4	10.1	11.2	12.3	13.3	14.4	13.9

V massimo [m ³]	325.8	326.1	326.4	326.7	326.9	327.2	327.5	327.8	328.0	328.3	328.6	328.9	329.1	329.4	329.7
A serbatoio [m ²]	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Altezza serbatoio [m]	4.29	4.24	4.18	4.13	4.09	4.04	3.99	3.95	3.91	3.86	3.82	3.78	3.74	3.70	3.66
Altezza di sicurezza [m]	5.14	5.08	5.02	4.96	4.90	4.85	4.79	4.74	4.69	4.63	4.58	4.54	4.49	4.44	4.40

Tabella 15 Volumi mensili nel serbatoio e dimensionamento dello stesso per ogni combinazione in analisi per lo scenario 1 – colture poco idro-esigenti, orto

Come si evince da

Tabella 15, la situazione per l'orto è leggermente diversa. Se per la piantagione si parte da una condizione di serbatoio vuoto perché i vari fabbisogni lo permettono (non c'è mai richiesta in gennaio, quindi i serbatoi possono riempirsi), nel caso dell'orto, al quale, si ricorda, è associato anche l'orfanotrofio con i relativi fabbisogni idrici civili, questa condizione non è più sostenibile. Avere anche dei fabbisogni idrici civili da soddisfare significa avere una richiesta di volumi fissa e costante durante tutto l'anno. Poiché ciò comporta crisi nei mesi iniziali dell'anno, ovvero quei mesi in cui non si hanno ancora grandi volumi a disposizione, allora è necessario partire da una condizione di serbatoio pieno. Per far ciò, si sono ipotizzati 5 mesi di solo riempimento.

Detto ciò, si nota subito come, in questo esempio, il valore dell'area del serbatoio sia diverso per ognuna delle 15 possibilità. Il volume massimo oscilla da un minimo di 325.8 m³ ad un massimo di 329.7 m³ mentre l'altezza va via via riducendosi come conseguenza dell'aumento della superficie. Questi parametri potrebbero essere la base per un'eventuale scelta da parte di un ipotetico costruttore: i volumi da contenere, come visto, sono più o meno simili, però la tabella suggerisce una certa flessibilità rispetto alle dimensioni del serbatoio. In base alle esigenze anche se limitatamente ai valori mostrati, si può optare per un serbatoio esteso e basso oppure leggermente più alto, ma con una superficie ridotta.

4.2.3 Scenario 2, colture molto idro-esigenti – Piantagione

Per il secondo scenario si sono considerati il mais, il pomodoro e la manioca. Il mais, originario delle Americhe, appartiene alla famiglia delle *Graminacee* e trova diversi utilizzi nell'alimentazione umana e animale. Il pomodoro appartiene alla famiglia delle *Solanacee*, è presente nei climi caldo-temperati in varie forme e viene utilizzato anch'esso principalmente per l'alimentazione umana. Infine, la manioca, appartenente alla famiglia delle *Euforbiacee*, si usa per ottenere la fecola che verrà poi trasformata in tapioca. Fino al 2006, il paese principale produttore di manioca era la vicina Nigeria (*Treccani*).

	Area mais [m ²]	Area pomodoro [m ²]	Area manioca [m ²]	Area serbatoio [m ²]
1	61500	30000	38100	400
2	61550	30050	38000	400
3	61600	30100	37900	400
4	61650	30150	37800	400
5	61700	30050	37850	400
6	61100	30350	38100	450
7	61200	31050	37300	450
8	61350	30000	38200	450
9	61500	30900	37150	450
10	61950	30300	37300	450
11	59400	30150	39950	500
12	59600	30450	39450	500
13	59800	30350	39350	500
14	59900	30050	39550	500
15	60000	30250	39250	500

Tabella 16 Set di combinazioni prese ad esempio per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, piantagione

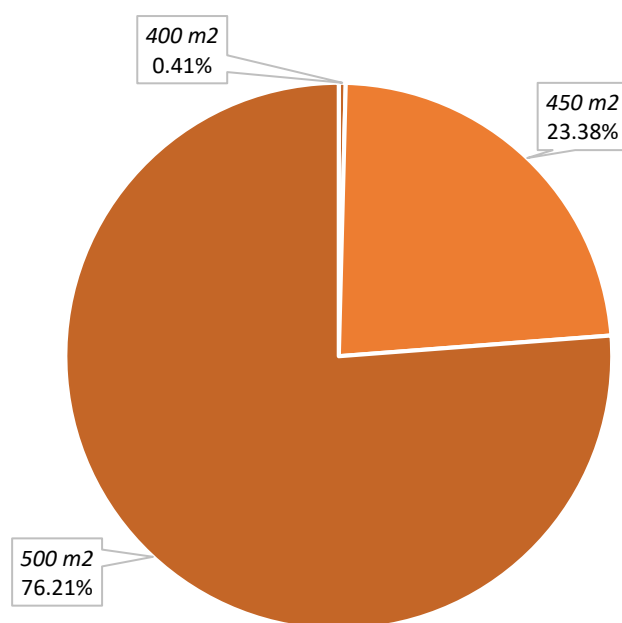


Figura 83 Grafico a torta che descrive la distribuzione percentuale delle combinazioni in base al relativo valore d'area del serbatoio per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, piantagione

In **Figura 83** si ha una distribuzione delle combinazioni totalmente diversa rispetto ai casi precedenti. Se per lo scenario con colture poco idro-esigenti si è parlato di distribuzione equa e, soprattutto, di poca significatività del valore di area del serbatoio, in questo caso bisogna dire il contrario. Poiché le colture hanno necessità di attingere al volume del serbatoio in quanto la precipitazione diretta non basta a soddisfarle, allora il valore della superficie del serbatoio assume una certa rilevanza. Si nota infatti come la percentuale di combinazioni associate ad un certo valore di superficie aumenta all'aumentare di tale valore. Ciò testimonia il fatto che maggiore è l'area del serbatoio e maggiore è il numero di possibili combinazioni che permettono il funzionamento del sistema.

Anche in questo caso si trova perfetta attinenza col grafico di **Figura 84** che rappresenta lo stesso scenario, ma per l'orto. Nonostante la minima percentuale sia più alta e la massima sia più bassa, anche per l'orto è chiara la proporzionalità che lega il valore di superficie del serbatoio al numero di combinazioni possibili.

	VOLUMI NEL SERBATOIO [m ³]														
seriale combinazione	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
gen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
feb	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
mar	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5
apr	59.1	59.1	59.1	59.1	59.1	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5	73.8	73.8	73.8	73.8	73.8
mag	109.7	109.7	109.7	109.7	109.7	123.4	123.4	123.4	123.4	123.4	137.2	137.2	137.2	137.2	137.2
giu	182.6	182.6	182.6	182.6	182.6	205.4	205.4	205.4	205.4	205.4	228.2	228.2	228.2	228.2	228.2
lug	213.5	213.5	213.5	213.5	213.5	240.2	240.2	240.2	240.2	240.2	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9
ago	95.4	97.5	99.7	101.8	108.1	87.3	75.2	114.5	100.4	148.4	3.1	8.9	25.7	40.9	42.5
set	130.0	132.1	134.3	136.4	142.7	126.3	114.1	153.4	139.3	187.3	46.3	52.1	68.9	84.2	85.7
ott	181.8	183.9	186.0	188.2	194.4	184.5	172.4	211.6	197.5	245.6	111.0	116.9	133.6	148.9	150.4
nov	198.0	200.1	202.3	204.4	205.9	202.8	190.6	229.9	215.8	221.9	131.3	137.2	153.9	169.2	170.7
dic	0.9	1.0	1.1	1.2	0.6	20.5	4.3	37.4	17.2	4.8	17.2	14.8	23.4	34.6	32.0

V massimo [m ³]	213.5	213.5	213.5	213.5	213.5	240.2	240.2	240.2	240.2	245.6	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9
A serbatoio [m ²]	400	400	400	400	400	450	450	450	450	450	500	500	500	500	500
Altezza serbatoio [m]	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.55	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
Altezza di sicurezza [m]	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64

Tabella 17 Volumi mensili nel serbatoio e dimensionamento dello stesso per ogni combinazione in analisi per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, piantagione

Risulta evidente da **Tabella 16** e da **Tabella 17** come siano cambiati, anche in modo piuttosto drastico, sia i valori dei volumi in gioco che le dimensioni dei serbatoi rispetto allo scenario precedente inerente alla piantagione. È comunque un cambiamento ampiamente prevedibile in virtù della diversa tipologia di colture che si stanno trattando. Com'è intuibile dalle combinazioni selezionate, l'intero sistema è sostenibile solo accettando una certa preponderanza dell'area del mais, che infatti in alcuni casi supera i 60000 m², rispetto alle aree destinate alle altre due colture le quali non raggiungono mai i 40000 m². A differenza dello scenario 1 per la piantagione, in questo caso non esiste una combinazione di aree capace di idratarsi con il solo apporto meteorico (e quindi senza serbatoio), ma anzi si rende necessaria una superficie del serbatoio di almeno 400 m². Nonostante questo, le altezze non cambiano dimostrando così una forte proporzionalità tra l'aumento areale e l'aumento del volume. La sola eccezione a questo discorso è la combinazione 10 la quale presenta un serbatoio leggermente più alto, ma la differenza è talmente piccola da poter essere imputata a necessari arrotondamenti. In questo caso non c'è grande scelta per un ipotetico costruttore, la cui unica flessibilità è legata all'area del serbatoio. Poiché quest'ultima assume valori anche abbastanza elevati, si potrebbe pensare di utilizzare più vasche che comunque garantiscano un volume massimo complessivo e un'area totale coerenti con quanto indicato in **Tabella 17**.

4.2.4 Scenario 2, colture molto idro-esigenti – Orto

	Area mais [m ²]	Area pomodoro [m ²]	Area manioca [m ²]	Area serbatoio [m ²]
1	118	53	79	76
2	98	51	101	77
3	99	90	61	78
4	123	52	75	79
5	89	110	51	80
6	50	79	121	81
7	60	112	78	82
8	58	70	122	83
9	143	52	55	84
10	60	127	63	85
11	76	63	111	86
12	82	96	72	87
13	106	59	85	88
14	75	111	64	89
15	50	60	140	90

Tabella 18 Set di combinazioni prese ad esempio per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, orto

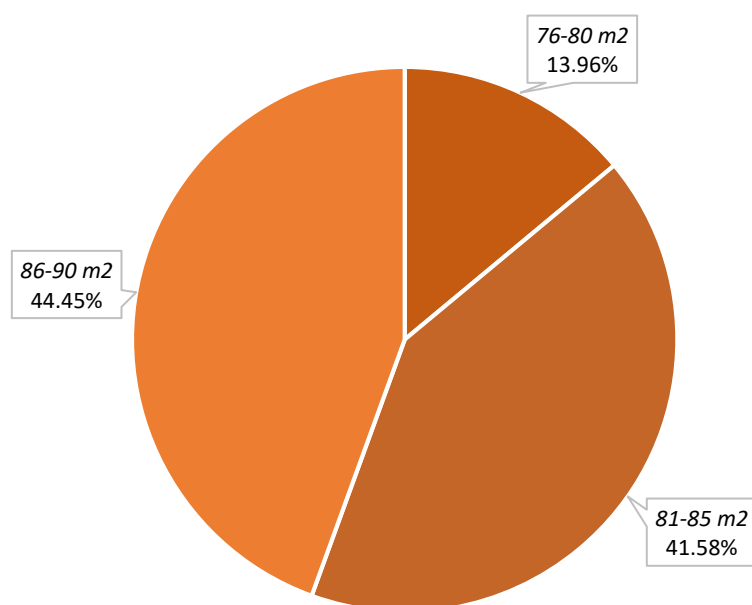


Figura 84 Grafico a torta che descrive la distribuzione percentuale delle combinazioni in base al relativo range di valori d'area del serbatoio per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, orto

	VOLUMI NEL SERBATOIO [m ³]														
seriale combinazione	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ago (solo riempimento)	39.1	39.1	39.2	39.2	39.2	39.3	39.3	39.3	39.4	39.4	39.4	39.4	39.5	39.5	39.5
set (solo riempimento)	127.6	127.7	127.8	127.9	128.0	128.2	128.3	128.4	128.5	128.6	128.8	128.9	129.0	129.1	129.2
ott (solo riempimento)	256.9	257.1	257.4	257.6	257.9	258.1	258.4	258.6	258.9	259.1	259.4	259.6	259.9	260.1	260.4
nov (solo riempimento)	312.2	312.5	312.8	313.1	313.4	313.7	314.0	314.2	314.5	314.8	315.1	315.4	315.7	316.0	316.3
dic (solo riempimento)	325.8	326.1	326.4	326.7	326.9	327.2	327.5	327.8	328.0	328.3	328.6	328.9	329.1	329.4	329.7
gen	227.8	228.1	228.3	228.6	228.8	229.1	229.3	229.6	229.9	230.1	230.4	230.6	230.9	231.1	231.4
feb	159.6	159.9	160.1	160.4	160.6	160.9	161.2	161.4	161.7	161.9	162.2	162.4	162.7	163.0	163.2
mar	130.4	130.7	131.0	131.3	131.6	131.9	132.3	132.6	132.9	133.2	133.5	133.8	134.2	134.5	134.8
apr	119.4	119.8	120.2	120.6	121.0	121.4	121.8	122.2	122.6	123.0	123.4	123.8	124.2	124.6	125.0
mag	142.8	143.3	143.9	144.4	144.9	145.4	146.0	146.5	147.0	147.6	148.1	148.6	149.1	149.7	150.2
giu	215.4	216.1	216.8	217.5	218.2	218.9	219.6	220.3	221.0	221.7	222.5	223.2	223.9	224.6	225.3
lug	191.1	191.9	192.7	193.5	193.6	195.1	195.2	196.6	197.4	196.9	199.0	199.6	200.6	200.7	202.1
ago	125.5	124.9	124.7	128.1	124.4	124.1	124.0	126.5	132.2	125.4	130.4	130.6	134.2	130.8	131.9
set	112.7	112.2	112.1	115.6	112.0	111.7	111.7	114.3	120.1	113.4	118.5	118.8	122.5	119.1	120.4
ott	137.4	137.1	137.1	140.6	137.2	137.0	137.2	139.9	145.8	139.3	144.5	144.9	148.8	145.5	146.9
nov	91.5	91.2	91.2	94.3	91.4	91.3	91.5	94.3	96.9	93.7	99.0	99.4	103.3	100.1	101.5
dic	0.1	0.1	0.2	2.7	0.4	0.2	0.4	3.2	4.5	2.6	7.8	8.2	12.1	8.9	10.3

V massimo [m ³]	325.8	326.1	326.4	326.7	326.9	327.2	327.5	327.8	328.0	328.3	328.6	328.9	329.1	329.4	329.7
A serbatoio [m ²]	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Altezza serbatoio [m]	4.29	4.24	4.18	4.13	4.09	4.04	3.99	3.95	3.91	3.86	3.82	3.78	3.74	3.70	3.66
Altezza di sicurezza [m]	5.14	5.08	5.02	4.96	4.90	4.85	4.79	4.74	4.69	4.63	4.58	4.54	4.49	4.44	4.40

Tabella 19 Volumi mensili nel serbatoio e dimensionamento dello stesso per ogni combinazione in analisi per lo scenario 2 – colture molto idro-esigenti, orto

Per questo caso valgono le considerazioni fatte per lo scenario con colture poco idro-esigenti dell'orto: si parte dalla condizione di serbatoio pieno e l'area del serbatoio è diversa per ognuna delle 15 possibilità (**Tabella 18**). Bisogna sottolineare però anche un'analogia molto significativa, cioè che i valori dei volumi e quindi il dimensionamento che ne consegue sono identici a quelli dello scenario con le colture poco idro-esigenti. Questo porta a pensare che, con le combinazioni d'area prese come riferimento, il sistema non sia dipendente dal tipo di coltura. Se infatti ci si focalizza sul mese nel quale si manifesta il massimo valore di volume si nota che esso fa parte dei cosiddetti mesi di riempimento che, vista la definizione del loro bilancio che prevede solo i termini di precipitazione ed evaporazione, risultano totalmente indipendenti dal tipo di coltura. Ciò determina quindi lo stesso dimensionamento in quanto il valore di volume massimo da contenere appartiene ad un mese per il quale i bilanci sono identici per i due diversi scenari.

4.2.5 Scenario 3, monocoltura – Piantagione

	Area serbatoio [m²]	Area coltura [m²]
fagiolo 'occhio nero'	0	130000
arachide	0	130000
fagiolo di soia	4200	125800
manioca	6200	123800
sorgo	13200	116800
mais	13600	116400
patata dolce	14900	115100
pomodoro	15900	114100
riso	25400	104600

Tabella 20 Distribuzione della superficie totale della piantagione per coltura

	fagiolo 'occhio nero'	arachide	fagiolo di soia	manioca	sorgo	mais	patata dolce	pomodoro	Riso
Area coltura	130000	130000	125800	123800	116800	116400	115100	114100	104600
	VOLUMI NEL SERBATOIO [m³]								
gen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
feb	0.0	0.0	16.1	23.7	50.6	52.1	57.1	60.9	97.3
mar	0.0	0.0	272.8	402.8	857.5	883.5	967.9	1032.9	1650.0
apr	0.0	0.0	620.2	915.6	1949.2	2008.3	2200.3	2348.0	3750.8
mag	0.0	0.0	1152.1	1700.7	3620.9	3730.6	4087.2	4361.5	6967.5
giu	0.0	0.0	1916.9	2829.7	6024.5	6207.0	6800.4	7256.8	11592.6
lug	0.0	0.0	54.0	3309.1	6214.8	7258.7	5195.9	5841.5	11404.1
ago	0.0	0.0	182.8	34.1	41.5	7675.8	3.8	11.4	4301.5
set	0.0	0.0	546.2	570.5	1183.5	8852.5	1293.0	1387.1	3881.0
ott	0.0	0.0	1089.8	1372.9	2891.9	10612.6	3221.3	3444.9	7168.2
nov	0.0	0.0	1260.3	1624.7	3427.8	2892.2	3826.3	4090.4	1865.9
dic	0.0	0.0	1206.4	1545.1	3258.3	38.1	3634.9	3886.2	30.4
V massimo [m³]	0.0	0.0	1916.9	3309.1	6214.8	10612.6	6800.4	7256.8	11592.6
A serbatoio [m²]	0	0	4200	6200	13200	13600	14900	15900	25400
Altezza serbatoio [m]			0.46	0.53	0.47	0.78	0.46	0.46	0.46
Altezza di sicurezza [m]			0.55	0.64	0.56	0.94	0.55	0.55	0.55

Tabella 21 Volumi e dimensionamenti risultanti dalla divisione della superficie totale della piantagione

La **Tabella 20**, così come la **Tabella 21**, fanno entrambe riferimento ad uno scenario monocoltura e sono di facile interpretazione. In questo caso non ci sono combinazioni da settare al meglio in modo da ottimizzare la risorsa, ma bisogna semplicemente andare a capire quali sono le dimensioni del serbatoio che permettono il completo apporto idrico necessario allo sviluppo della specie selezionata. È importante precisare che l'area del serbatoio non è tanto più estesa quanto più alta è la richiesta d'acqua della i -esima coltura (questo è chiaro confrontando **Figura 80** con **Tabella 20**), ma è più corretto dire che l'area del serbatoio è tanto più estesa quanto più marcata è la differenza tra l'andamento della richiesta delle colture e l'andamento delle piogge. Trattandosi di monocoltura, le superfici dei serbatoi sono molto più grandi rispetto a quelle viste finora. Nel caso della piantagione, la coltura che peggio si adatta all'andamento delle piogge e che quindi richiede un serbatoio più esteso è il riso (25400 m², una superficie improponibile) mentre le colture che meglio si adattano e che non richiedono alcun approvvigionamento idrico aggiuntivo sono l'arachide e il fagiolo 'occhio nero', quest'ultimo infatti tipico dell'Africa occidentale.

4.2.6 Scenario 3, monocoltura – Orto

	Area serbatoio [m ²]	Area coltura [m ²]
fagiolo 'occhio nero'	76	250
arachide	76	250
fagiolo di soia	80	250
manioca	83	250
sorgo	91	250
patata dolce	93	250
pomodoro	95	250
mais	98	250
riso	122	250

Tabella 22 Distribuzione della superficie totale dell'orto per coltura

	fagiolo 'occhio nero'	arachide	fagiolo di soia	manioca	sorgo	patata dolce	pomodoro	mais	riso
Area coltura	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	VOLUMI NEL SERBATOIO [m³]								
ago (solo riempimento)	39.1	39.1	39.2	39.3	39.6	39.6	39.7	39.8	40.5
set (solo riempimento)	127.6	127.6	128.0	128.4	129.3	129.6	129.8	130.1	133.0
ott (solo riempimento)	256.8	256.8	257.8	258.6	260.5	261.0	261.5	262.3	268.2
nov (solo riempimento)	312.2	312.2	313.3	314.2	316.5	317.1	317.6	318.5	325.4
dic (solo riempimento)	325.8	325.8	326.9	327.7	329.9	330.4	331.0	331.8	338.4
gen	227.8	227.8	228.8	229.5	231.6	232.1	232.6	233.3	239.4
feb	159.6	159.6	160.6	161.3	163.4	163.9	164.4	165.2	171.3
mar	130.3	130.3	131.6	132.5	135.1	135.7	136.3	137.3	144.9
apr	119.4	119.4	121.0	122.2	125.4	126.2	127.0	128.2	137.7
mag	142.8	142.8	144.9	146.5	150.7	151.7	152.8	154.3	167.0
giu	215.4	215.4	218.2	220.3	226.0	227.4	228.8	230.9	247.9
lug	191.1	191.1	189.9	196.6	201.1	198.5	200.3	208.4	222.1
ago	125.6	125.6	124.5	124.3	122.0	121.2	121.5	143.6	139.2
set	112.8	112.8	112.1	112.1	110.5	109.9	110.3	132.7	124.1
ott	137.5	137.5	137.2	137.7	137.1	136.7	137.4	160.2	154.7
nov	91.5	91.5	91.5	92.1	91.8	91.5	92.3	97.4	95.5
dic	0.5	0.5	0.4	0.9	0.5	0.3	1.0	0.3	0.3
V massimo [m³]	325.8	325.8	326.9	327.7	329.9	330.4	331.0	331.8	338.4
A serbatoio [m²]	76	76	80	83	91	93	95	98	122
Altezza serbatoio [m]	4.29	4.29	4.09	3.95	3.62	3.55	3.48	3.39	2.77
Altezza di sicurezza [m]	5.14	5.14	4.90	4.74	4.35	4.26	4.18	4.06	3.33

Tabella 23 Volumi e dimensionamenti risultanti dalla divisione della superficie totale dell'orto

In questo caso vale tutto quanto detto per lo scenario monocoltura della piantagione, per cui si vanno ad analizzare le differenze, dettate in gran parte dall'ulteriore utilizzo domestico che si ha in questo secondo caso. Dal confronto tra **Tabella 20** e **Tabella 22** si nota come l'ordine delle colture per dimensione del relativo serbatoio sia diverso, appunto a causa dell'utilizzo domestico che va a modificare il quadro di insieme mentre un altro aspetto da evidenziare è che tutte le colture richiedono l'installazione di un serbatoio. Essendo la superficie destinata a coltura molto più piccola rispetto alla piantagione, i valori in gioco sono ben più piccoli e variano dai 76 m² di superficie del serbatoio richiesti da una monocoltura di fagiolo 'occhio nero' e di arachide ai 122 m² richiesti dalla monocoltura di riso. A grandi linee questi risultati sono coerenti coi precedenti in quanto arachide e fagiolo 'occhio nero' si confermano le colture migliori e il riso quella peggiore.

CONCLUSIONI

Il problema col quale si è aperto l'elaborato riguardava la crescente richiesta d'acqua causata dall'aumento demografico globale e dal surriscaldamento dell'atmosfera. Essendo un problema piuttosto serio e di entità mondiale non si è lavorato con la presunzione di trovare soluzioni o alternative valide, piuttosto è stato portato avanti un tentativo per cercare di migliorare l'utilizzo dell'acqua in un paese in cui vi sono margini per migliorare. Nel contesto attuale, che è un contesto di forte cambiamento, risulta di grande interesse focalizzarsi sulle aree che saranno quelle più colpite sia dall'aumento demografico (secondo indexmundi.com, nel 2018 in Benin si sono contate 35 nascite ogni 1000 abitanti) sia dai cambiamenti climatici in atto. Se tali criticità potranno essere combattute dai vari enti e dalle grandi società, la lotta sarà impari per una piccola realtà come quella di un orfanotrofio o di una piantagione. In questo scenario si inserisce il lavoro svolto che punta ad una sussistenza dettata dalla conoscenza del clima, del territorio e dei fabbisogni idrici di colture e persone. Si ritiene che queste conoscenze possano risultare fondamentali in un futuro prossimo e siano fondamentali anche oggi per comprendere al meglio gli impatti di una eventuale "corsa all'acqua" e per provare a pianificare delle contromisure appropriate. Quello che si vuole esaltare con la presente tesi non è tanto il caso particolare, ma la metodologia seguita per ottimizzare l'utilizzo del quantitativo d'acqua di pioggia che può essere recuperato. Si ritiene che tale metodologia possa essere utile a migliorare le condizioni di vita di popolazioni che, negli anni, hanno sofferto gravi carenze dovute a siccità e mancato sviluppo e si spera di aver fornito uno strumento utile che possa alimentare la coscienza del fatto che attraverso una buona gestione delle risorse idriche, anche se limitate, si possa ottenere un livello di benessere maggiore. Si auspica inoltre che la realizzazione degli scenari proposti e dei relativi (ed eventuali) serbatoi possa essere una spinta verso il raggiungimento di condizioni migliori per la comunità di Allada.

Volgendo lo sguardo ai risultati, bisogna evidenziare che essi nascono da valutazioni fatte su dati di pioggia e di evaporazione. Si sono utilizzati dei valori medi, presupponendo l'assenza di eventi catastrofici o rilevanti per la situazione meteorologica globale che pure, in virtù delle nuove ricerche nel settore, appaiono tutt'altro che trascurabili. Il fatto di aver utilizzato valori medi sta a significare che si è sintetizzato, restando comunque coerenti alla realtà, sia l'andamento delle piogge che dell'evaporazione. Tutto il lavoro svolto poggia sulla previsione che i dati futuri avranno gli stessi parametri statistici ricavabili fino ad oggi; ciò non vuol dire che si ripeteranno uguali a sé stessi col passare degli anni, ma che l'andamento generale resterà quello ampiamente descritto nell'elaborato. Al netto di queste considerazioni, lo studio ha

mostrato un quadro ben definito nel territorio beninese: la quantità di risorsa disponibile, se si considera anche l'acqua che non si riesce a sfruttare (es. acqua di falda), non è poi così critica, specie nel sud, mentre le maggiori problematiche si riscontrano nel recupero e nell'utilizzo della stessa risorsa. Questo porta a pensare che, come detto, ci siano ampi margini per poter migliorare la situazione, passando, in primis, per lo sviluppo di tecnologie e tecniche tali da poter incrementare il quantitativo effettivo di risorsa disponibile e, in seconda battuta, cercando di aggiornare o, laddove non ve ne siano, creare dei sistemi efficienti per la gestione della risorsa sul piano tecnico, politico e sociale. L'errore da evitare per i soggetti coinvolti in queste dinamiche di sviluppo è quello di concentrarsi unicamente sul recupero della risorsa tralasciando il resto del ciclo dell'acqua che è quello che poi ne garantisce la rinnovabilità; ciò assume particolare rilevanza nell'ottica di un benessere duraturo nel tempo.

L'altro punto sul quale ci si focalizza è l'utilizzo irriguo. In letteratura è presente una sterminata mole di informazioni riguardanti i tipi di colture e le loro caratteristiche e un accesso a questo tipo di informazioni garantirebbe un parametro di valutazione in più, basato sul dispendio idrico, nella scelta delle specie da piantare. Se si abbinano queste conoscenze alle nozioni sull'andamento delle piogge, si può notare come spesso non sia così importante il volume totale da fornire, ma il periodo in cui esso è richiesto; non a caso, seppur in un contesto mondiale decisamente globalizzato, si parla di *colture tipiche* le quali, appunto, si sposano naturalmente col clima e con il luogo che le ospita. In questo senso viene in aiuto il ciclo naturale ed è per questo che tutta la trattazione su utilizzo irriguo e colture è partita da una ricerca delle specie tipiche dell'area.

Si evidenzia inoltre il fatto che si è lavorato con scenari relativamente semplici contenenti al massimo tre colture. Nel corso della preparazione dell'elaborato si è provato a eseguire gli stessi procedimenti con scenari più vari ma, se a livello di processo e di ragionamento non vi è alcuna differenza con gli esempi riportati, sicuramente l'ostacolo aggiuntivo è rappresentato dal numero di dati da trattare. Ciò è sintomo del fatto che la presenza di più variabili, in questo caso le aree di coltivazione si erano portate da 3 a 6, aumenta esponenzialmente tutte le possibili combinazioni da sottoporre ai criteri di selezione. L'operazione risulta quindi teoricamente fattibile, ma per la messa in pratica è necessaria un'elevata potenza di calcolo che non può essere raggiunta con *Matlab* e con il calcolatore adoperato.

Riassumendo, il lavoro di stesura dell'elaborato è partito dallo studio del territorio per arrivare a determinare scenari in cui, utilizzando dei semplici serbatoi, il soddisfacimento delle richieste idriche di persone e colture viene soddisfatto dalle sole piogge, siano esse dirette o raccolte. Per

far ciò si è passati attraverso la determinazione di dati di pioggia, di evaporazione e colturali, ricavati e combinati tra loro in base alle esigenze. I risultati ottenuti sono stati

- la caratterizzazione dell'andamento delle piogge a scala locale, basandosi su dati relativi alla stazione della città di Allada;
- la definizione dei fabbisogni idrici mensili, sia in termini di altezze che, introducendo le aree, in termini volumetrici, delle colture tipiche dell'area all'interno del contesto climatico beninese;
- i tre diversi scenari relativi alla piantagione e il dimensionamento degli eventuali serbatoi;
- i tre diversi scenari relativi all'orto (uso irriguo) e all'orfanotrofio (uso civile) e il dimensionamento degli eventuali serbatoi;
- gli script *Matlab* per l'individuazione degli scenari e il dimensionamento dei serbatoi. Tali codici, se modificati, potrebbero essere usati per l'introduzione di nuovi scenari e la verifica della sostenibilità idrica di altre turnazioni di colture.

Un'ultima riflessione la meritano i dimensionamenti effettuati. Se si procede al confronto tra le misure ipotizzate per la piantagione e quelle ipotizzate per l'orto si noterà come la forma dei serbatoi proposti sia totalmente differente. Questa differenza è da imputare alle diverse modalità di recepimento dell'acqua. Nel caso della piantagione l'unico modo per recuperare la pioggia consiste nell'agire sulla superficie, in quanto il volume raccolto sarà, per forza di cose, direttamente proporzionale alla superficie occupata: maggiore sarà la superficie del serbatoio, che di fatto rappresenta la superficie di captazione della risorsa, e maggiore sarà il quantitativo di acqua che si riuscirà a stoccare. Ciò determina quindi dei serbatoi che si sviluppano maggiormente in piano piuttosto che in altezza. A causa di quanto detto, in questo caso non si ha molta flessibilità sulla forma da dare al serbatoio, non si può quindi gestire il volume cercando di costruire dei serbatoi più alti perché, a parità di volume, si dovrebbe ridurre l'area determinando così una sensibile diminuzione dell'acqua raccolta e quindi del volume da stoccare calcolato inizialmente.

La situazione è molto diversa per quanto riguarda l'orfanotrofio e l'orto annesso. In questo caso i serbatoi ipotizzati sono poco estesi, ma molto alti. I piccoli valori di superficie sono giustificati dal fatto che la fonte primaria di approvvigionamento idrico non è l'acqua che precipita nel serbatoio, ma quella che si riesce a recuperare dalla copertura della struttura. Dato che, per motivi di ingombro, si è vincolato il valore di superficie del serbatoio ad essere il più piccolo

possibile, si è avuto come risultato uno sviluppo in altezza atto a contenere i volumi di acqua in gioco. Il vantaggio di questa configurazione rispetto alla precedente è legato alla flessibilità. Qualora si volesse allentare il vincolo dell'ingombro, non ci sarebbero problemi a modificare le dimensioni stabilite, ma, anzi, ciò determinerebbe un ulteriore apporto idrico captato dalla superficie aggiuntiva.

Dal punto di vista architettonico, una scelta intelligente potrebbe essere quella di recuperare i volumi che servono dal terreno e questo potrebbe essere fatto totalmente (per i serbatoi bassi richiesti dalla piantagione) o parzialmente (per i serbatoi più alti si potrebbe pensare di far emergere dal piano campagna solo una parte dell'altezza totale). Interrando i serbatoi ed impermeabilizzandone le pareti si risparmierebbe materiale da costruzione e si eviterebbe l'impiego di utensili e macchinari che potrebbero non essere disponibili in aree poco sviluppate. Ovviamente tale soluzione richiede degli accorgimenti e presenta dei limiti. L'accorgimento principale da avere è quello di evitare di posizionare queste vasche nelle zone d'ombra di alberi o strutture in quanto questo potrebbe influire sull'effettiva quantità di pioggia recuperata. Inoltre, le aree destinate a questo scopo andrebbero delimitate. Partendo dal presupposto che non è possibile installare alcun tipo di pompa, il limite principale è invece dovuto al sistema col quale l'acqua può essere presa dal serbatoio. Da questo punto di vista infatti è più vantaggioso avere dei serbatoi sopraelevati così da poter creare un fondo inclinato che, sfruttando la gravità, convogli tutto il quantitativo verso un angolo in cui vi sarà un'uscita regolata da un rubinetto. Un ultimo accorgimento che accomuna entrambe le soluzioni è quello relativo alla rimozione di materiale solido (foglie, rami, sabbia...) dal serbatoio. Quest'operazione è importante sia per evitare otturazioni che per avere a disposizione tutto il volume stimato. Si potrebbe pensare di effettuare dei cicli di pulizia quando il serbatoio è quasi vuoto, ovvero, generalmente, tra la fine di un anno e l'inizio di un altro.

Appendice

Esempio di script per la piantagione

```
clc
clear all

%-----INPUT-----

%valori di area del fagiolo di soia, fagiolo occhio nero e sorgo che
%variano da 40000 a 50000 con passo 50
A_fags=40000:50:50000;
A_fago=40000:50:50000;
A_sor=40000:50:50000;

%valori di area del serbatoio che variano da 0 a 200 con passo 50
A_s=0:50:200;

%inizializzazione di una matrice con 1 riga e 5 colonne composta da soli 0
comb_ree=zeros(1,5);

%inizializzazione di un vettore 1x1 che indicizza le combinazioni che si
%vogliono ottenere
id_comb=0;

%-----CALCOLO-----

%cicli che considerano tutti i valori delle aree
for id_A_fags=1:length(A_fags)
    for id_A_fago=1:length(A_fago)
        for id_A_sor=1:length(A_sor)
            for id_A_s=1:length(A_s)

%creazione di un vettore riga 1x5 con le aree imposte dai cicli
                prossima_comb=[A_fags(id_A_fags) A_fago(id_A_fago)...
                    A_sor(id_A_sor) A_s(id_A_s) A_fags(id_A_fags)+...
                    A_fago(id_A_fago)+A_sor(id_A_sor)+A_s(id_A_s)];

%verifica dell'area totale e richiamo della funzione "check_crisi"
                if prossima_comb(1,5)==130000
                    responso=check_crisi(prossima_comb);

%verifica dell'output della funzione
                    if responso==1

%iterazione del procedimento e implementazione della matrice comb_ree
                        id_comb=id_comb+1;
                        comb_ree(id_comb,:)=prossima_comb;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

%-----FUNZIONE-----
```

```

function RESPONSO=check_crisi (combinazione)

%-----INPUT-----

%area di coltivazione (si esclude il serbatoio)
A_ns=130000-combinazione(1,4);

%inizializzazione dei vari ETc come vettori colonna
ET_sor=[0;0;0;0;0;36.81;99.09;101.74;49.57;0;0;0];
ET_fago=[0;0;0;57.88;133.25;54.74;0;0;0;0;0;0];
ET_fags=[0;0;0;0;0.88;95.58;109.37;13.72;0;0;0;0];

%inizializzazione di precipitazione ed evaporazione come vettori colonna
P=[10.33;32.08;87.34;103.71;146.18;197.54;91.98;45.42;101.07;147.46;...
    64.51;17.97];
E=[32.88;28.25;26.21;21;19.54;15.45;14.65;14.75;14.55;18.04;23.91;30.81];

RESPONSO=1;

%-----CALCOLO-----

%fabbisogni idrici relativi ad ogni valore (area) del vettore "combinazione"
FI_fags=ET_fags/1000.*combinazione(1,1);
FI_fago=ET_fago/1000.*combinazione(1,2);
FI_sor=ET_sor/1000.*combinazione(1,3);

%vettore colonna del volume precipitato solo sull'area di coltivazione
P_culture=P/1000*A_ns;

%vettore colonna del fabbisogno idrico totale
FI_tot=FI_fags+FI_sor+FI_fago;

%vettore colonna di eccedenza/deficit
ED=P_culture-FI_tot;

%inizializzazione vettore colonna del volume da fornire per l'irrigazione
IRR=zeros(12,1);

%ciclo col quale si valuta l'eccedenza o il deficit
for id_ED=1:length(ED)

%per eccedenza, implementazione vettore IRR con 0
    if ED(id_ED)>0
        IRR(id_ED,1)=0;

%per deficit, implementazione vettore IRR col volume d'acqua da fornire
    else
        IRR(id_ED,1)=-ED(id_ED);
    end
end

%vettori colonna di precipitazione nel serbatoio ed evaporaz dal serbatoio
P_serb=P/1000*combinazione(1,4);
E_serb=E/1000*combinazione(1,4);

%inizializzazione del vettore colonna che indica il volume nel serbatoio
V_serb=zeros(12,1);

%implementazione della riga 1 del vettore V_serb (mese di gennaio)
V_serb(1)=P_serb(1)-IRR(1)-E_serb(1);

%volume negativo è irrealistico, quindi si imposta 0 come limite inferiore
if V_serb(1)<0

```

```

        V_serb(1)=0;
end

%ciclo per i restanti mesi di funzionamento
for id_V_serb=2:length(V_serb)

%condizione per l'output ed eventuale implementazione del vettore V_serb
    if V_serb(id_V_serb)>=0
        V_serb(id_V_serb)=V_serb(id_V_serb-1)+P_serb(id_V_serb)...
            -IRR(id_V_serb)-E_serb(id_V_serb);
    else
        RESPONSO=0;
    end
end
end
end

```

Esempio di script per l'orto

```

clc
clear all

%-----INPUT-----

%valori di area del fagiolo di soia, fagiolo occhio nero e sorgo che
%variano da 50 a 150 con passo 1
A_fags=50:1:150;
A_fago=50:1:150;
A_sor=50:1:150;

%valori di area del serbatoio che variano da 0 a 90 con passo 1
A_s=0:1:90;

%inizializzazione di una matrice con 1 riga e 5 colonne composta da soli 0
comb_ree=zeros(1,5);

%inizializzazione di un vettore 1x1 che indicizza le combinazioni che si
%vogliono ottenere
id_comb=0;

%-----CALCOLO-----

%cicli che considerano tutti i valori delle aree
for id_A_fags=1:length(A_fags)
    for id_A_fago=1:length(A_fago)
        for id_A_sor=1:length(A_sor)
            for id_A_s=1:length(A_s)

%creazione di un vettore riga 1x5 con le aree imposte dai cicli
                prossima_comb=[A_fags(id_A_fags) A_fago(id_A_fago),...
                    A_sor(id_A_sor) A_s(id_A_s) A_fags(id_A_fags)+...
                    A_fago(id_A_fago)+A_sor(id_A_sor)];

%verifica dell'area totale e richiamo della funzione "check_crisi"
                if prossima_comb(1,5)==250
                    responso=check_crisi(prossima_comb);

%verifica dell'output della funzione
                    if responso==1

```



```

%iterazione del procedimento e implementazione della matrice comb_aree
        id_comb=id_comb+1;
        comb_aree(id_comb,:)=prossima_comb;
    end
end
end
end
end
end

%-----FUNZIONE-----

function RESPONSO=check_crisi(combinazione)

%-----INPUT-----

%area della copertura dalla quale viene convogliata acqua di pioggia
A_cop=900;

%riduzione dell'A_cop nell'ipotesi di un effettivo recupero del 90%
A_cop_ridotta=A_cop*0.9; %ho ridotto l'area coperta totale del 10%

%si sta considerando un volume d'acqua pari a 45 l/ab/giorno per 75 utenti
n_utenti=75;
FI_utenze=45;

%inizializzazione dei vari ETc come vettori colonna
ET_sor=[0;0;0;0;0;36.81;99.09;101.74;49.57;0;0;0];
ET_fago=[0;0;0;57.88;133.25;54.74;0;0;0;0;0;0];
ET_fags=[0;0;0;0;0.88;95.58;109.37;13.72;0;0;0;0];

%inizializzazione di precipitazione ed evaporazione come vettori colonna
P=[10.33;32.08;87.34;103.71;146.18;197.54;91.98;45.42;101.07;147.46;...
    64.51;17.97];
E=[32.88;28.25;26.21;21;19.54;15.45;14.65;14.75;14.55;18.04;23.91;30.81];

RESPONSO=1;

%-----CALCOLO-----
%-----

%fabbisogni idrici relativi ad ogni valore(area) del vettore "combinazione"
FI_fags=ET_fags/1000.*combinazione(1,1);
FI_fago=ET_fago/1000.*combinazione(1,2);
FI_sor=ET_sor/1000.*combinazione(1,3);

%vettore colonna del fabbisogno idrico totale delle sole colture
FI_colture=FI_fags+FI_fago+FI_sor;

%vettore colonna del volume precipitato solo sull'area di coltivazione
P_colture=P/1000*250;

%vettore colonna di eccedenza/deficit
ED=P_colture-FI_colture;

%inizializzazione vettore colonna del volume da fornire per l'irrigazione
IRR=zeros(12,1);

%ciclo col quale si valuta l'eccedenza o il deficit
for id_ED=1:length(ED)

```

```

%per eccedenza, riempimento vettore IRR con 0
    if ED(id_ED)>0
        IRR(id_ED,1)=0;

%per deficit, riempimento vettore IRR col volume d'acqua da fornire
    else IRR(id_ED,1)=-ED(id_ED);
    end
end

%vettore colonna relativo ai giorni per ogni mese dell'anno
giorni_mese=[31;28;31;30;31;30;31;31;30;31;30;31];

%calcolo del volume per uso domestico per ogni mese
V_utenze=FI_utenze/1000*giorni_mese*n_utenti;

%vettori colonna di precipitazione diretta nel serbatoio, precip che arriva
%dalla grondaia ed evaporaz dal serbatoio
P_serb_gr=P/1000*A_cop_ridotta;
P_serb=P/1000*combinazione(1,4);
E_serb=E/1000*combinazione(1,4);

%inizializzazione del vettore colonna che indica il volume nel serbatoio.
%le 17 righe sono comprensive dei 5 mesi di solo riempimento
V_serb=zeros(17,1);

%implementazione della riga 1 del vettore V_serb (I mese di riemp - agosto)
V_serb(1)=P_serb_gr(8)+P_serb(8)-E_serb(8);

%ciclo per i successivi mesi di riempimento (set, ott, nov e dic)
for id_V_serb=2:5

%implementazione delle righe 2:5 del vettore V_serb
V_serb(id_V_serb)=V_serb(id_V_serb-1)+P_serb_gr(id_V_serb+7)+...
    P_serb(id_V_serb+7)-E_serb(id_V_serb+7);

%volume negativo è irrealistico, quindi si imposta 0 come limite inferiore
    if V_serb(id_V_serb)<0
        V_serb(id_V_serb)=0;
    end
end

%ciclo per i mesi di funzionamento
for id_V_serb=6:length(V_serb)

%implementazione delle righe 6:17 del vettore V_serb (anno di funzionam)
    V_serb(id_V_serb)=V_serb(id_V_serb-1)+P_serb(id_V_serb-5)+...
        P_serb_gr(id_V_serb-5)-IRR(id_V_serb-5)-E_serb(id_V_serb-5)-...
        V_utenze(id_V_serb-5);

%condizione per l'output
    if V_serb(id_V_serb)>=0
        RESPONSO=1;
    else
        RESPONSO=0;
    end
end
end
end

```


Bibliografia

Adegnika F., Adjou Moumouni A., Akpata J., Clegbaza G., Da Silveira M., Daout P., Fafoumi Been A., Gbodogbe J. C., Houanye A. K., Houessou A., Kpinssoton G., Serpos H. D. T., Toupe A., (2009), *L'eau, l'assainissement, la vie et le developpement humain durable*

Alé G., Borel Y., Gualde R., Le Barbé L., Millet B., Texier H., (1993), *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*, 540 pp, Orstom éditeur

Alidou S., Alzouma K.A., Bellion G., Deklasz I., Dubois D., Durand A., Guiraud R., Houessou A., Kogbe C., Lang J., (1990), The Continental Terminal in West Africa, *Journal of Africa Earth Sciences*, 10, 79-99

Allen R.G., Pereira S. L., Raes D., Smith M., (1998), Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and drainage*, 56

ARGAB ONG, (2014), *Essai d'analyse de la situation actuelle de l'eau et du climat en republique du Benin*

Azonsi F., Gohoungossou A., Kpomasse M., Lanhoussi F., Tossa A., Zannou A., (2008), *Atlas hydrographique du Bénin – Un Système d'Information sur l'hydrographie*, Direction generale de l'eau

Azontonde, H.A., (1991), Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin, *International Association of Hydrological Sciences*, 199, 249-258

Cirilli S., (2015), *Analisi tecnica e caratterizzazione del pluviometro NESA PLUVANS-PL1000 riscaldato*, 10 pp, Università degli Studi di Trieste – rapporto OM 163

Cossi Adomou A. (2005), *Vegetation patterns and environmental gradients in Benin*, 136 pp, Wageningen University

FAO-AQUASTAT Rapports, (2005), *Profil de Pays – Benin*

Gruber I., Kloos J., Schopp M., (2009), Seasonal water demand in Benin's agriculture, *Journal of Environmental Management*, 90, 196-205

Harris, I., Jones, P.D., Lister, D.H., Osborn, T.J. (2014), Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset, *International Journal of Climatology*, 34, 623–642

Megale P. G., (2009), *Richiami di idrologia dell'irrigazione*, Università di Pisa

Partenariat Mondial de l'Eau – Afrique de l'Ouest (GWP/AO), Programme de gouvernance des ressources en eau – Composante Afrique de l'Ouest (PFWG/GAO), (2009), *Evaluation de la gouvernance de l'eau au Bénin*

UNICEF, *Republique du Bénin – Etude de faisabilite des forages manuels: identification des zones potentiellement favorables*

Sitografia

albertomontanari.it

britannica.com

presidence.bj

treccani.it

wikipedia.org

worldwater.org