UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E MECCANICA

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

L'APPLICAZIONE DELLE TECNICHE DI TELERILEVAMENTO IN IRRIGAZIONE

Caso studio del Consorzio di Bonifica

del Sannio Alifano

RELATORE

Prof. Ing. Giovanni DE MARINIS

CANDIDATO

Pietro BRANCACCIO

MATRICOLA 0021733

CORRELATORE

Ing. Massimo NATALIZIO

Anno Accademico 2016/2017

Come ogni cosa che faccio anche questa è dedicata a te, Carla.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare, il mio Relatore, il Professore Ingegnere Giovanni De Marinis, per aver suscitato in me l'interesse verso la disciplina delle costruzioni idrauliche e dell'idraulica in generale e per gli insegnamenti che mi ha dato riguardanti la materia e il percorso di vita rigoroso che ognuno di noi dovrebbe avere.

Ringrazio il mio Correlatore, l'Ingegnere Massimo Natalizio nella veste del Direttore del Consorzio di bonifica del Sannio Alifano, per la sua disponibilità, gentilezza e prontezza nel rispondere ad ogni mia perplessità.

Ringrazio l'Ingegnere Roberto Pignatelli per la sua curiosità ed il suo interesse mostrato per il mio lavoro di tesi.

Ringrazio, tutta la mia famiglia, e i miei genitori per essermi stati sempre vicino.

Ringrazio i miei amici per i consigli e la loro lealtà.

Ringraziamenti III

INDICE DELLE FIGURE VII

INDICE DELLE TABELLE X

PREMESSA XI

INTRODUZIONE XII

CAPITOLO 1 1

EVAPOTRASPIRAZIONE 1

1.1. PROCESSO EVAPOTRASPIRATIVO 1

1.1.1. Metodi diretti per la stima dell'evapotraspirazione 3

1.1.2. Metodi indiretti per la stima dell'evapotraspirazione 5

1.1.3. Fattori che influenzano l'evapotraspirazione 6

CAPITOLO 2 22

STATO DELL'ARTE 22

2.1. FORMULAZIONI PER LA STIMA DI ET_0.....22

2.2. COEFFICIENTE COLTURALE K_C (SINGLE METHOD) 28

2.3. EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE 30

2.4. FABBISOGNO IRRIGUO 31

2.5. NUOVE TECNOLOGIE A SUPPORTO DELLA GESTIONE RAZIONALE DELL'AGRICOLTURA 34

2.5.1. Applicazione del telerilevamento.....36

2.5.2. Telerilevamento della vegetazione.....39

2.5.3. Fabbisogno irriguo da telerilevamento 43

CAPITOLO 3 47

CASO STUDIO CONSORZIO DI BONIFICA DEL SANNIO ALIFANO 47

3.1. LE FUNZIONI DEL CONSORZIO 48

3.2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE 49

3.4. DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI 56

3.4.1. Impianti di Vairano Patenora e Riardo-Pietramelara-Pietravairano 56

3.4.2. Impianto di Presenzano.....63

3.4.3. Sistema di telecontrollo.....65

3.5. TIPOLOGIE DI COLTURE E METODOLOGIE IRRIGUE ADOTTATE68

3.6. FOCUS AZIENDALE 73

3.7. IL PROGETTO IRRISAT 75

CAPITOLO 4 83

APPLICAZIONE DEL METODO ANALITICO 83

4.1. DATI AGROMETEREOLOGICI 83

4.2. APPROCCIO ANALITICO: applicazione diretta dell'equazione di Penman-Monteith 87

4.3. STIMA DEL COEFFICIENTE COLTURALE K_C 88

4.3.1. Coefficiente colturale durante la fase iniziale (Kc_{ini}).....89

4.3.2. Coefficiente colturale durante la fase media (Kc_{mid}) 90

4.3.3. Coefficiente colturale durante la fase di sviluppo ($Kc_{development}$).....91

4.3.4. Coefficiente colturale durante la fase finale (Kc_{end}) 91

4.4. STIMA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE ET_C.....94

4.5. STIMA DEI FABBISOGNI IRRIGUI 99

4.6. VOLUME IRRIGUO STIMATO 100

CAPITOLO 5 102

ANALISI, RISULTATI E DISCUSSIONI.....102

5.1. VOLUME IRRIGUO EROGATO.....102

5.2. VOLUME IRRIGUO DAL SERVIZIO IRRISAT.....104

CAPITOLO 6 108

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI 108

APPENDICE 111

A.1.....111

A.2.....116

A.3.....124

BIBLIOGRAFIA.....128

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1. APPARATO FOGLIARE. (HTTPS://WWW.TES.COM/LESSONS/JK1POKUWZAK-NQ/LE-FOGLIE-E-LA-FOTOSINTESI) 1
FIGURA 2. ANDAMENTO DELL'EVAPORAZIONE E TRASPIRAZIONE DURANTE LA CRESCITA DEL RACCOLTO (FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 56 CROP EVAPOTRANSPIRATION). 2
FIGURA 3. COMPONENTI DEL BILANCIO IDRICO. RACCOLTO (FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 56 CROP EVAPOTRANSPIRATION). 4
FIGURA 4. VALORI DELLA RADIAZIONE EXTRATERRESTRE NELL'ANNO PER DIFFERENTI LATITUDINI. (FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 56 CROP EVAPOTRANSPIRATION). 8
FIGURA 5. DECLINAZIONE SOLARE. (HTTP://WWW.METEO.SM/SOLARE.PHP) 10
FIGURA 6. ANDAMENTO DECLINAZIONE SOLARE NELL'ANNO. (HTTP://WWW.SOLARITALY.ENEA.IT/STRDIAGRAMMISOLARI/DECLINAZIONESOLARE.PHP)10
FIGURA 7. SPETTRO SOLARE. (HTTP://WWW.ENEA.IT/IT/SEGUICI/LE-PAROLE-DELLENERGIA/RADIAZIONE-SOLARE/QUALCOSA-DA-SAPERE-SUL-SOLE-1/SPETTRO-ELETTROMAGNETICO-SOLARE-E-ASSORBIMENTO-IN-ATMOSFERA) 11
FIGURA 8. INTENSITÀ RADIAZIONE SOLARE. (HTTP://WWW.ITISHERTZ.GOV.IT/MINISITI/SOLARE/RADIAZIONE.HTM) 12
FIGURA 9. COMPONENTI RADIAZIONE SOLARE. (HTTP://SUNFLOWERCPV.BLOGSPOT.IT/2013/09/IRRAGGIAMENTO-SOLARE-DNI.HTML) 12
FIGURA 10. COMPONENTI RADIAZIONI SOLARI NETTE. (FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 56 CROP EVAPOTRANSPIRATION). 17
FIGURA 11. RELAZIONE TRA LA PRESSIONE DI VAPORE SATURO E LA TEMPERATURA. (FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 56 CROP EVAPOTRANSPIRATION). 20
FIGURA 12. RESISTENZA SUPERFICIALE E AERODINAMICA. (FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 56 CROP EVAPOTRANSPIRATION). 25
FIGURA 13. ANDAMENTO DEL COEFFICIENTE COLTURALE. (IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 56 CROP EVAPOTRANSPIRATION). 29
FIGURA 14. PROCESSO DEL TELERILEVAMENTO. (HTTP://WWW.RICERCATTIVA.IT/APPROFONDIMENTI/COME-FUNZIONA-IL-PROCESSO-DEL-TELERILEVAMENTO-O-REMOTE-SENSING/) 37
FIGURA 15. SPETTRO ELETTROMAGNETICO COMPLETO. (HTTP://WWW.AC-ILSESTANTE.IT/STORIA/2016/CHIMICA/CHIMICA1.HTM) 38
FIGURA 16. CURVE DI RIFLETTANZA. 39
FIGURA 17. RIFLETTANZA CARATTERISTICA DEL TERRENO, DELLA VEGETAZIONE SECCA E VERDE. (BOSCHETTI, ET AL., 2005) 40
FIGURA 18. RIFLETTANZA NELLE BANDE SPETTRALI RISPETTIVAMENTE PER FOGLIA MORTA, STRESSATA E SANA. (HTTP://PHYSICSOPENLAB.ORG/2017/01/30/INDICE-NDVI/) 40

FIGURA 19. VALORI CARATTERISTICI DELL'INDICE NDVI. (HTTPS://WWW.ESA.INT/SPECIALS/EDUSPACE_GLOBAL_IT/SEMXMWSWT1H_0.HTML) ... 42
FIGURA 20. CONSORZIO DI BONIFICA DEL SANNIO ALIFANO, PIANA ALIFANA. 47
FIGURA 21. INQUADRAMENTO DEI CONFINI DEL VECCHIO E DEL NUOVO COMPRENSORIO. 51
FIGURA 22. REGIONE CAMPANIA: LIMITI DEL CONSORZIO DI BONIFICA DEL SANNIO ALIFANO. .. 52
FIGURA 23. AREE DEL CONSORZIO DI BONIFICA DEL SANNIO ALIFANO TELECONTROLLATE. 55
FIGURA 24. DISTRETTI DELLA PIANA DI RIARDO-PIETRAMELARA-PIETRAVAIRANO. 57
FIGURA 25. GRUPPO DI CONSEGNA COMIZIALE. 66
FIGURA 26. PERCENTUALE DI ERBA MEDICA. 70
FIGURA 27. PERCENTUALE DI MAIS. 70
FIGURA 28. PERCENTUALE DI ORTAGGI. 71
FIGURA 29. PERCENTUALE DI SPECIE ARBOREE. 71
FIGURA 30. SUPERFICIE COLTIVATA PER OGNI PIANA. 72
FIGURA 31. IN ARANCIO LA PARTICELLA COLTIVATA A MAIS. 73
FIGURA 32. IN ROSSO LA PARTICELLA COLTIVATA CON ERBA MEDICA. 74
FIGURA 33. PROCESSAMENTO DEI DATI ALLA BASE DEL CONSIGLIO IRRIGUO (WWW.IRRISAT.IT).76
FIGURA 34. FOGLIO INFORMATIVO DI CAMPO INVIATO TRAMITE POSTA ELETTRONICA (WWW.AGRICOLTURA.REGIONE.CAMPANIA.IT). 77
FIGURA 35. MAPPA DELL'INDICE NDVI, PER L'AZIENDA CHE COLTIVA ERBA MEDICA RISPETTIVAMENTE NEI MESI DI MAGGIO (A), GIUGNO (B), LUGLIO (C), AGOSTO (D). 79
FIGURA 36. MAPPA DELL'INDICE NDVI, PER L'AZIENDA CHE COLTIVA MAIS RISPETTIVAMENTE NEI MESI DI MAGGIO (A), GIUGNO (B), LUGLIO (C), AGOSTO PRIMA DEL RACCOLTO (D), AGOSTO DOPO IL RACCOLTO (E). 80
FIGURA 37. ANDAMENTO DELL'INDICE NDVI PER L'ERBA MEDICA. 81
FIGURA 38. ANDAMENTO DELL'INDICE NDVI PER IL MAIS. 81
FIGURA 39. ANDAMENTO DELL'ETC PER L'ERBA MEDICA. 82
FIGURA 40. ANDAMENTO DELL'ETC PER IL MAIS 82
FIGURA 41. STAZIONE AGROMETEOROLOGICA DI ALIFE. (HTTP://WWW.AGRICOLTURA.REGIONE.CAMPANIA.IT/METEO/METEO_2018.HTML) 84
FIGURA 42. PIOGGIA CUMULATA NEI MESI DELLA STAGIONE IRRIGUA. 85
FIGURA 43. ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA MASSIMA E MINIMA NEI MESI DELLA STAGIONE IRRIGUA. 85
FIGURA 44. ANDAMENTO DELL'UMIDITÀ RELATIVA NEI MESI DELLA STAGIONE IRRIGUA. 86
FIGURA 45. ANDAMENTO DELLA VELOCITÀ DEL VENTO NEI MESI DELLA STAGIONE IRRIGUA. 86
FIGURA 46. ANDAMENTO DELLA RADIAZIONE SOLARE NEI MESI DELLA STAGIONE IRRIGUA. 87
FIGURA 47. ANDAMENTO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE STANDARD. 88
FIGURA 48. ANDAMENTO DEL COEFFICIENTE COLTURALE PER IL MAIS NELL'INTERA STAGIONE IRRIGUA. 92
FIGURA 49. ANDAMENTO DEL COEFFICIENTE COLTURALE PER LE SPECIE ARBOREE NELL'INTERA STAGIONE IRRIGUA. 93
FIGURA 50. ANDAMENTO DEL COEFFICIENTE COLTURALE PER GLI ORTAGGI NELL'INTERA STAGIONE IRRIGUA. 93

FIGURA 51. ANDAMENTO DEL COEFFICIENTE COLTURALE PER L'ERBA MEDICA NELL'INTERA STAGIONE IRRIGUA. 94
FIGURA 52. ANDAMENTO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE PER IL MAIS NELL'INTERA STAGIONE IRRIGUA. 96
FIGURA 53. ANDAMENTO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE PER GLI ORTAGGI NELL'INTERA STAGIONE IRRIGUA. 96
FIGURA 54. ANDAMENTO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE PER LE SPECIE ARBOREE NELL'INTERA STAGIONE IRRIGUA. 97
FIGURA 55. ANDAMENTO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE PER L'ERBA MEDICA NELL'INTERA STAGIONE IRRIGUA. 98

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1. DISPONIBILITÀ DEI SERVIZI DI CONSIGLIO IRRIGUO PER REGIONE (REG. (UE) 1305/2013, PROGRAMMA NAZIONALE DI SVILUPPO RURALE 2014-2020- ALLEGATO 9 METODOLOGIA DI STIMA DEI VOLUMI IRRIGUI) 35

TABELLA 2. ANALISI DEI SERVIZI DI CONSIGLIO IRRIGUO (REG. (UE) 1305/2013, PROGRAMMA NAZIONALE DI SVILUPPO RURALE 2014-2020- ALLEGATO 9 METODOLOGIA DI STIMA DEI VOLUMI IRRIGUI) 35

TABELLA 3. COMPRENSORIO DEL CONSORZIO DI BONIFICA DEL SANNIO ALIFANO 52

TABELLA 4. DISTRETTI IRRIGUI (FONTE SIGRIAN) 54

TABELLA 5. VALORI DEL COEFFICIENTE COLTURALE DURANTE LA FASE INIZIALE, PER LE DIVERSE COLTURE. 90

TABELLA 6. VALORI DEL COEFFICIENTE COLTURALE DURANTE LA FASE MEDIA, PER LE DIVERSE COLTURE. 90

TABELLA 7. VALORI DEL COEFFICIENTE COLTURALE DURANTE LA FASE DI SVILUPPO, PER LE DIVERSE COLTURE. 91

TABELLA 8. VALORI DEL COEFFICIENTE COLTURALE DURANTE LA FASE FINALE, PER LE DIVERSE COLTURE. 92

TABELLA 9. VALORI DELL'ETC DURANTE L'INTERA STAGIONE IRRIGUA, PER LE DIVERSE COLTURE. 95

TABELLA 10. VALORI DEL FABBISOGNO IRRIGUO, PER LE DIVERSE COLTURE. 100

TABELLA 11. VALORI DEI VOLUMI IRRIGUI STIMATI, PER LE DIVERSE COLTURE. 101

TABELLA 12. VALORI DEI VOLUMI IRRIGUI EROGATI E STIMATI CON IL METODO FAO PER LE DIVERSE PIANE. 102

TABELLA 13. AREE DELLE COLTURE IN PERCENTUALE PER CIASCUNA PIANA. 103

TABELLA 14. VALORI DEI VOLUMI IRRIGUI EROGATI E STIMATI SECONDO IL METODO FAO PER LE AZIENDE OGGETTO DI STUDIO. 103

TABELLA 15. AREE EFFETTIVE DEL CONSORZIO E AREE RILEVATE DA SATELLITE. 104

TABELLA 16. VOLUMI EFFETTIVI DEL CONSORZIO, VOLUMI STIMATI CON LA METODOLOGIA FAO E VOLUMI RILEVATI DA IRRISAT. 105

TABELLA 17. VOLUMI EFFETTIVI E FABBISOGNI DEL CONSORZIO, VOLUMI RILEVATI E FABBISOGNI DA IRRISAT, VOLUMI RILEVATI E FABBISOGNI CON IL METODO FAO PER LE SINGOLE PARTICELLE. 106

TABELLA 18. FABBISOGNO IRRIGUO PER COLTURA STIMATO CON IL METODO FAO E RILEVATO DA IRRISAT. 106

PREMESSA

Ci troviamo in una nuova epoca, dominata dalla scarsità di risorsa idrica, dove la progettazione delle opere idrauliche a servizio dell'uomo non avviene più considerando l'acqua come bene inesauribile, ma avviene secondo la sua disponibilità. Ciò porta cambiare il modo di pensare e progettare le opere al servizio dell'uomo, poiché con l'esaurirsi di questa risorsa, indispensabile per la vita, non si pensa più, a progettare come se questa fosse un bene inesauribile, ma si valuta prima la possibilità o meno di poterla avere, e poi cosa è possibile realizzare con essa.

Lo studio che segue, guarda al futuro e a come sia possibile risparmiare la risorsa idrica, in un ambito dove essa è di fondamentale importanza "l'agricoltura". Sfruttando nuove tecniche, che permettono (con sistemi avanzati di telerilevamento della vegetazione) di controllare lo sviluppo delle colture in tempo reale, fornendo informazioni sul fabbisogno idrico di cui una coltura necessita e di quando questa ne ha bisogno. In questo modo si cerca di aiutare gli imprenditori agricoli e gli enti preposti all'irrigazione e alla bonifica (Consorzi di Bonifica), guidandoli verso un risparmio idrico, basato non solo sull'esperienza degli utenti sul campo, ma anche guardando l'effettiva richiesta di acqua delle piantagioni, in modo da minimizzare gli sprechi e far sviluppare le colture secondo condizioni ottimali di adacquamento.

INTRODUZIONE

La risorsa idrica per l'agricoltura è la base da cui si parte per avere raccolti soddisfacenti in qualità e quantità. Oggi anche nei paesi che non hanno carenza idrica si tende verso sistemi che possano portare ad un risparmio di questa risorsa, anche perché i continui cambiamenti climatici con la scarsità delle piogge, che portano ad una riduzione degli accumuli idrici nei bacini e l'industrializzazione sempre più idroesigente, destano preoccupazione sulla disponibilità futura dell'acqua, secondo quanto consigliato dalle Nazioni Unite nell'Agenda Globale per lo sviluppo sostenibile 2030. Per questi motivi vi è l'esigenza nel ricercare dei metodi per ottimizzare l'impiego dell'acqua in tutte le sue destinazioni d'uso, in particolare in agricoltura poiché per avere lo sviluppo delle colture, bisogna fornire notevoli volumi idrici. Allora il risparmio può partire nell'intervenire sulle tubazioni a servizio delle singole aziende agricole, che in taluni casi risultano alquanto fatiscenti, per le loro perdite. Un contributo fondamentale può venire direttamente dagli utenti, sui loro comportamenti nell'uso della risorsa, cercando nuove conoscenze sulle tecniche irrigue, capendo quando è il momento per fornire l'acqua alle colture e quali sono i volumi da somministrare. Oggi basare tutte queste decisioni, solo sull'esperienza del singolo imprenditore agricolo, non può essere un criterio adeguato per valutare se intervenire o meno con l'irrigazione.

Per capire di quanta acqua fornire alle colture, bisogna partire da modelli che si basano su bilanci idrici, ossia tra la quantità d'acqua che la coltura perde per evapotraspirazione e quella che riceve dalla pioggia. Questo per stabilire quando sia il momento esatto per irrigare, solo che i suddetti modelli necessitano di dati di campo e di calcoli alquanto elaborati, con notevole dispendio di tempo. Per questi motivi la ricerca sta evolvendo su metodi alternativi per migliorare i tempi e i quantitativi degli interventi irrigui in agricoltura. In questo studio viene affrontata la valutazione del fabbisogno idrico delle colture, ai fini della gestione oculata della risorsa idrica, mediante: il metodo analitico consigliato nel quaderno *FAO 56*, consolidato nella progettazione delle opere irrigue, che percorre un approccio *two-steps* nella stima del componente principale del fabbisogno irriguo (l'evapotraspirazione); ed il sistema IRRISAT che si avvale del metodo del telerilevamento perseguendo un approccio *one-step*. Il caso studio si cala nel territorio del bacino Mediterraneo, nell'Italia Meridionale, nelle piane di Presenzano, Vairano Patenora e Riardo-Pietravairano-Pietramelara, ricadenti nel comprensorio gestito dal Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano.

CAPITOLO 1

EVAPOTRASPIRAZIONE

1.1. PROCESSO EVAPOTRASPIRATIVO

Tutto il sistema flora presente sul nostro pianeta, per nascere, crescere e riprodursi, assorbe attraverso l'apparato radicale acqua dal suolo, trasmettendola agli apparati terminali costituiti dalle foglie. Dagli stomi di queste, attraverso il fenomeno della fotosintesi clorofilliana, l'acqua subisce un cambiamento di fase, da liquido a vapore diffondendosi nell'atmosfera, in quanto le piante per poter assumere anidride carbonica devono mantenere gli stomi aperti (figura 1), e in tal modo perdono una percentuale di acqua. Questo è in sintesi il fenomeno della *traspirazione fogliare*, che accade in maggior parte durante le ore diurne.

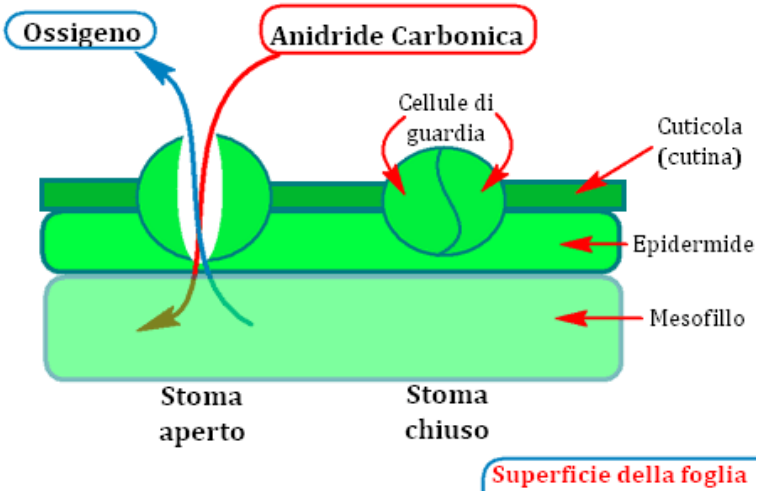

Figura 1. Apparato fogliare. (https://www.tes.com/lessons/JK1PoKUwzak-NQ/le-foglie-e-la-fotosintesi)

Un ulteriore fenomeno è la perdita per *evaporazione*, il passaggio di fase avviene in modo lento e regolare, interessando gli strati superficiali del fluido, in quanto le particelle appartenenti a tali strati sono meno legate a quelle interne e possono abbandonare il liquido con più facilità e trasformarsi in vapore. Tale fenomeno avviene a prescindere dalla temperatura, e dalla superficie adacquata, sia essa una strada, un lago, un fiume, un bosco, ecc. L'energia necessaria al cambiamento di fase è dettata dalla volta celeste. I fattori che innescano il processo sono: la radiazione solare, la temperatura dell'aria, la velocità del vento e la differenza di pressione di vapor d'acqua tra la superficie di evaporazione e l'atmosfera. La combinazione simultanea di questi due fenomeni, traspirazione ed evaporazione, dà luogo all'evapotraspirazione. Tali processi non possono essere studiati separatamente, in quanto è molto difficile spiegare quali dei due gioca un peso maggiore, per cui vengono studiati contemporaneamente.

L'andamento delle due aliquote, di evaporazione e traspirazione, può essere visto nel grafico seguente:

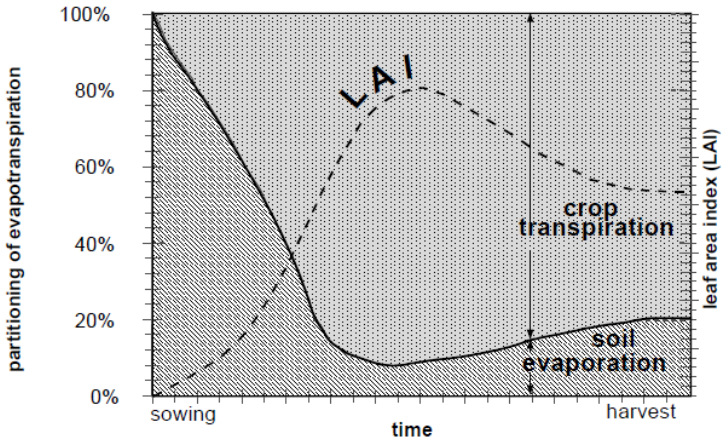

Figura 2. Andamento dell'evaporazione e traspirazione durante la crescita del raccolto (FAO Irrigation and drainage paper 56 Crop evapotranspiration).

È evidente che la frazione di evaporazione decresce all'aumentare del periodo di crescita del raccolto, mentre la traspirazione ha un andamento opposto. Questo è

spiegato dal fatto che quando il suolo è nudo, o nelle prime fasi di sviluppo della coltura, l'evaporazione è più elevata e sarà la componente principale dell'evapotraspirazione; al crescere del raccolto la traspirazione andrà ad aumentare, poiché l'apparato fogliare andrà via via crescendo e ostacolerà l'evaporazione dal suolo. In dettaglio dovrebbe essere portata in conto un'ulteriore aliquota dovuta all'acqua costituzionale o cellulare, che essendo irrilevante quantitativamente rispetto alle aliquote relative all'evapotraspirazione, non viene considerata. Possiamo quindi affermare che l'evapotraspirazione è il consumo idrico della coltura.

Ai fini della stima di risorsa idrica, è inevitabile la conoscenza del fenomeno evapotraspirativo. Non è semplice misurare l'evapotraspirazione, per determinarla ci si può avvalere di metodi *diretti* e *indiretti*.

1.1.1. Metodi diretti per la stima dell'evapotraspirazione

I metodi diretti si avvalgono di dispositivi specifici come il lisimetro e misure accurate di parametri fisici, che consentono attraverso bilanci idrici e/o di energia, la stima dell'evapotraspirazione ET. Questi metodi sono costosi ed esigono misure accurate, inoltre non sono sempre disponibili gli strumenti che permettono di eseguire i bilanci, per questo motivo vengono utilizzati spesso metodi indiretti per la stima di ET. I suddetti metodi diretti possono essere utilizzati per calibrare delle relazioni che consentono di stimare l'evapotraspirazione in maniera indiretta, senza l'uso dei dispositivi sopra citati.

Uno dei metodi diretti si basa sull'applicazione del **principio di conservazione dell'energia**, poiché il processo evapotraspirativo è regolato da uno scambio di energia sulla superficie fogliare: l'energia che arriva su tale superficie deve risultare pari all'energia che si disperde da essa nella stessa unità di tempo. L'equazione del bilancio energetico può essere scritta come:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (1)$$

Dove:

R_n è la radiazione netta,

G è il flusso di calore del suolo,

λET è il flusso di calore latente,

H è il calore sensibile.

Quest'equazione è limitata ai soli quattro componenti, in quanto i contributi di energia dovuti al calore immagazzinato o rilasciato dalla pianta, e all'energia relativa alle attività metaboliche non sono stati considerati poiché trascurabili rispetto ai componenti principali.

L'evapotraspirazione può essere stimata dalle componenti del **bilancio idrico nel terreno,** il metodo consiste nel valutare il flusso idrico in entrata e in uscita dalla zona radicale, entro un certo periodo di tempo:

$$ET = I + P - RO - DP + CR \pm \Delta SF \pm \Delta SW \quad (2)$$

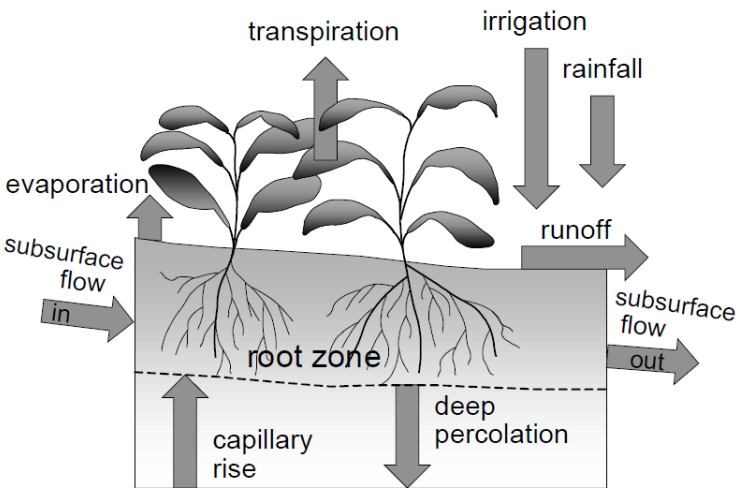

Figura 3. Componenti del bilancio idrico. raccolto (FAO Irrigation and drainage paper 56 Crop evapotranspiration).

Il metodo spiega che l'evapotraspirazione (ET) è il risultato di un bilancio idrico tra: l'irrigazione (I) e la pioggia (P) che apportano acqua, il deflusso superficiale (RO) insieme alla percolazione profonda (DP) che sono le aliquote che vengono sottratte poiché in uscita dal sistema, l'apporto dovuto alla capillarità (CR) che è in entrata nel sistema, la differenza di portata superficiale in ingresso e in uscita dal volume di controllo (DSF) , e la variazione del contenuto idrico dello strato di terreno (DSW).

I termini nell'equazione dell'equilibrio del bilancio idrico possono essere stimati con maggior precisione utilizzando il **lisimetro**. Mediante questo strumento la coltura cresce in vasche isolate riempite di terreno con caratteristiche note. Pesando le vasche, la perdita è stimata direttamente per differenza di massa, in questo modo l'evapotraspirazione è stimata con una precisione di pochi centesimi di millimetro. Esistono anche lisimetri in cui l'evapotraspirazione è determinata detraendo l'acqua di drenaggio dall'acqua totale in ingresso. Questo metodo ha dei costi elevati per cui l'uso del lisimetro è molto limitato.

In generale la precisione dei metodi diretti analizzati dipende essenzialmente dalla precisione con cui sono stati stimati i termini che intervengono nei bilanci, i quali a loro volta sono soggetti a numerose aleatorietà: umidità del terreno, dipendenza dal tempo, variazioni idriche all'interno dello strato considerato, perdite per ruscellamento e percolazione, apporto idrico di falda ed efficienza delle piogge.

1.1.2. Metodi indiretti per la stima dell'evapotraspirazione

L'evapotraspirazione è soggetta ad un'estrema variabilità dovuta a fattori colturali come: la specie, le fasi di crescita; i fattori pedologici (umidità del terreno); i fattori climatici (radiazione solare, temperatura, velocità del vento, umidità relativa dell'aria). Siccome le misure di campo sono suscettibili ad incertezze e inaccuratezze, al fine di ridurle, è stata ipotizzata un'evapotraspirazione potenziale di riferimento ET_0, ottenuta sulla base di dati meteorologici. Numerose sono le

equazioni empiriche e semi-empiriche che negli anni sono state sviluppate per valutare ET_0.

1.1.2.1. Evapotraspirazione di riferimento ET_0

Si definisce evapotraspirazione di riferimento o standard, il tasso di evapotraspirazione di una grande area, coperta interamente con erba verde, di altezza tra gli 8 e i 15 cm, che cresce attivamente, in assenza di carenza d'acqua, ed espressa in mm nell'unità di tempo, (mm/gg, mm/mese, mm/stagione). ET_0 è quindi la quantità d'acqua che evapotraspira da una determinata superficie, da una coltura ideale "*Festuca arundinacea"* di caratteristiche standard. Inoltre tale coltura deve essere coltivata in maniera tale che la qualità dell'acqua, le caratteristiche geologiche del terreno e gli elementi nutritivi non ne limitino la produzione. Sotto le ipotesi standard l'unica variabilità è rappresentata dai fattori climatici, i quali influenzano significativamente lo sviluppo del processo descritto. Il valore di ET_0 è un valore base, rappresenta la convenzione e quindi il riferimento per stimare il fabbisogno idrico di tutte le colture, attraverso il coefficiente colturale K_c, che relaziona l'evapotraspirazione standard ET_0 all'evapotraspirazione effettiva della coltura, ET o ET_c.

1.1.3. Fattori che influenzano l'evapotraspirazione

I principali fattori che influenzano l'evapotraspirazione sono imputabili, sia a parametri fisici che climatici, alcuni sono misurati attraverso stazioni di misura, altri sono relazionati a misure di dati che possono essere ricavati attraverso relazioni dirette o empiriche. I parametri climatici fondamentali nel processo di evaporazione sono: la radiazione solare, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la velocità del vento. Inoltre il fenomeno di evaporazione è influenzato dai parametri atmosferici, quali il calore latente di vaporizzazione λ, la pressione atmosferica e la costante psicrometrica.

1.1.3.1. Parametri climatici

La raccolta dei dati meteorologici è di notevole importanza, in quanto sulla base di questi si svolge tutta l'analisi per addivenire all'evapotraspirazione finale. I dati sono registrati da stazioni agro-meteorologiche, che purtroppo non sono presenti in ogni zona della terra, per cui laddove esse siano presenti e funzionanti è possibile svolgere le analisi in questione. Nei casi in cui non siano presenti dati o dove questi siano esigui, lo studio dell'evapotraspirazione risulterà sempre meno affidabile, se non inutile. Qualora sia necessario stimare l'evapotraspirazione in zone dove non sono presenti i dati meteorologici, ci si può avvalere di formulazioni che richiedono un numero limitato di parametri metereologici come quella di Blaney-Criddle, Hargreaves, Thornthwaite, Turc e altre presenti in letteratura (KISI, 2013).

Radiazione extra-atmosferica R_a

Nella valutazione di tale energia si fa rifermento ad una costante solare pari a 0.082 MJ/m^2min, definita come la quantità di radiazione solare globale che arriva nell'unità di tempo su un'area unitaria posta fuori dall'atmosfera terrestre, perpendicolare ai raggi solari, quando la distanza terra-sole è pari ad 1 unità astronomica[1]. Questa è la radiazione extra-atmosferica R_a, e la sua intensità è determinata dall'angolo tra la direzione dei raggi solari e la normale alla superficie dell'atmosfera, infatti l'inclinazione varia durante l'arco del giorno al variare della latitudine e della stagione climatica. Se quest'angolo è nullo la radiazione extra-atmosferica coincide con la costante solare sopra definita.

[1] Si definisce unità astronomica la distanza media tra il sole e la terra ed è pari a $1.496 \cdot 10^8$ Km.

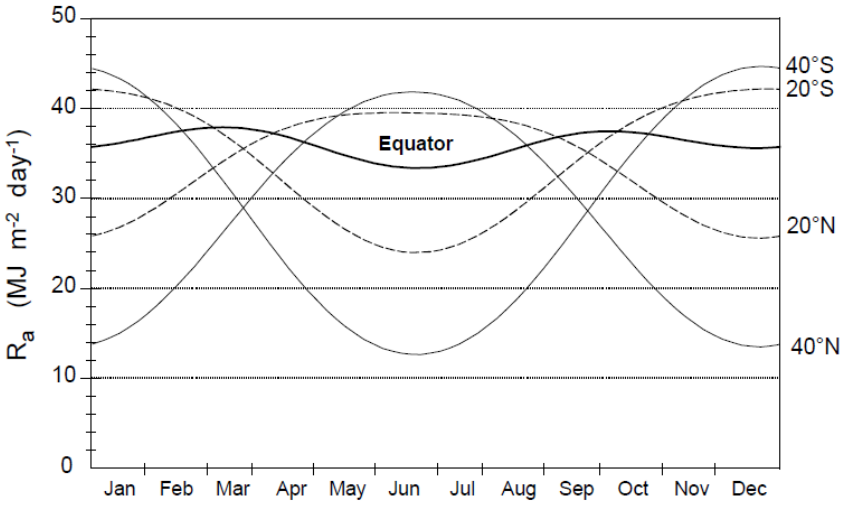

Figura 4. Valori della radiazione extraterrestre nell'anno per differenti latitudini. (FAO Irrigation and drainage paper 56 Crop evapotranspiration).

La radiazione solare incidente varia nel corso dell'anno, in funzione della distanza terra-sole, della torbidità dell'atmosfera, e della presenza delle nuvole che riflettono o assorbono parte della radiazione, ciò è esprimibile attraverso la relazione:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{SC} \cdot d_r \cdot [\omega_S \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s] \qquad (3)$$

Dove:

R_a : radiazione extra-atmosferica [MJ/m^{2}d]

G_{SC} : costante solare [MJ/m^{2}min]

d_r : distanza relativa Terra-Sole

ω_S : angolo orario al tramonto [rad]

φ : latitudine, positiva per l'emisfero nord e negativa per l'emisfero sud [rad]

δ : declinazione solare [rad]

La distanza relativa Terra-Sole può essere stimata mediante la seguente espressione:

$$dr = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \tag{4}$$

La declinazione solare (figura 5 e 6) è data dalla seguente:

$$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1.39\right) \tag{5}$$

Le formule (4) e (5) sono funzioni di *J* che corrisponde al numero di giorno dell'anno, sarà quindi 1 per il primo giorno dell'anno e 365 o 366 per l'ultimo giorno dell'anno. Una delle equazioni per il calcolo mensile di *J*, a metà del mese, è:

$$J = INTERO\ (30.42 \cdot M - 15) \tag{6}$$

Dove:

M: numero del mese

J: j-esimo giorno dell'anno, può anche essere calcolato per analisi giornaliere e decadali mediante altre formule.

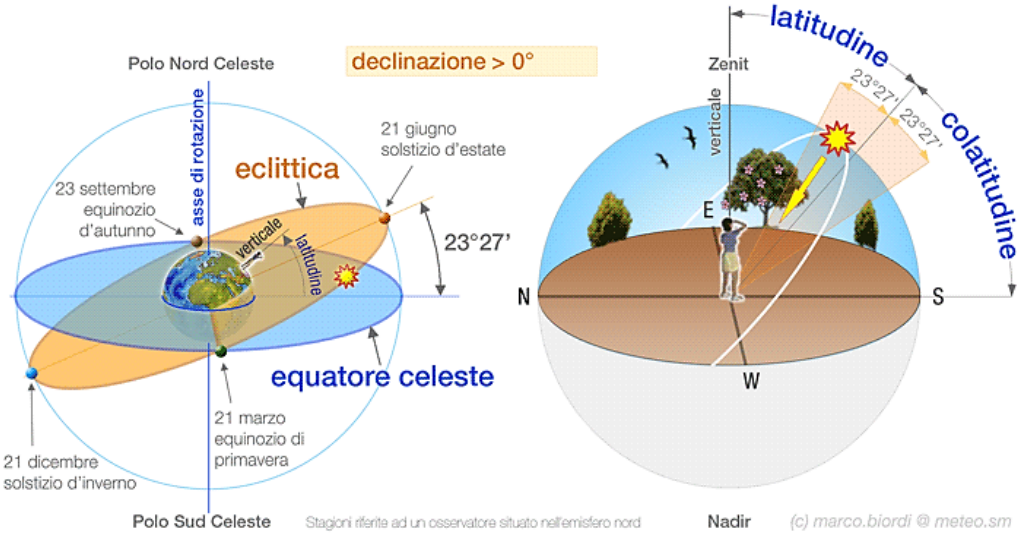

Figura 5. Declinazione solare. (http://www.meteo.sm/solare.php)

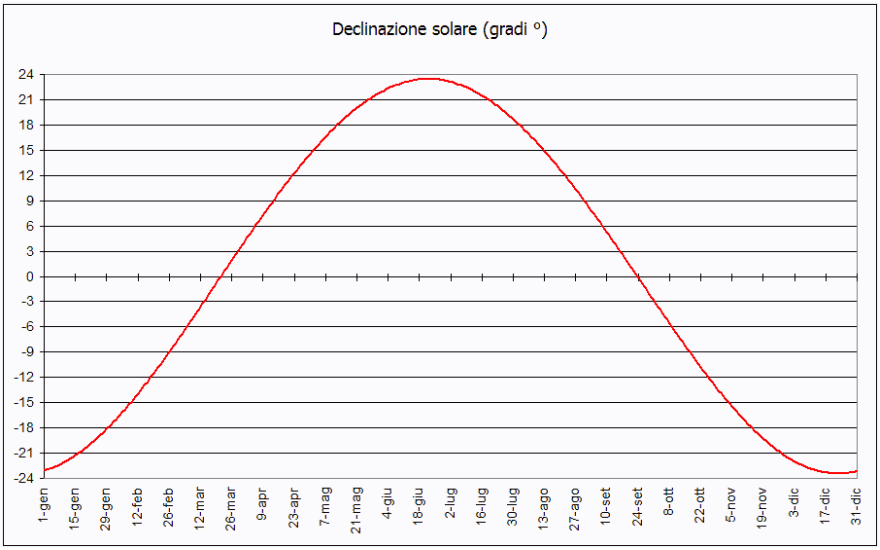

Figura 6. Andamento declinazione solare nell'anno.
(http://www.solaritaly.enea.it/StrDiagrammiSolari/DeclinazioneSolare.php)

L'angolo solare al tramonto è calcolato mediante la seguente:

$$\omega_S = \arccos[-\tan\varphi \cdot \tan\delta] \tag{7}$$

Radiazione solare R_s

L'energia necessaria al passaggio di stato dalla fase liquida alla fase vapore, è fornita dalla radiazione solare, essa è l'energia radiante emessa dal sole sprigionata dalle reazioni termonucleari di fusione che avvengono nel nucleo del sole producendo radiazioni elettromagnetiche. Nel momento in cui la radiazione penetra nell'atmosfera avvengono alcuni fenomeni che selezionano l'energia, una parte viene riflessa verso lo spazio, una parte è diffusa in tutte le direzioni dalle molecole dei gas atmosferici e una parte è assorbita dalle molecole dell'atmosfera per poi essere riemessa come radiazione infrarossa. Lo spettro della radiazione solare (figura 7) ha la massima energia a 150 Km di altitudine, ma nell'attraversamento della ionosfera, i raggi X, i raggi gamma e quelli ultravioletti vengono filtrati da essa.

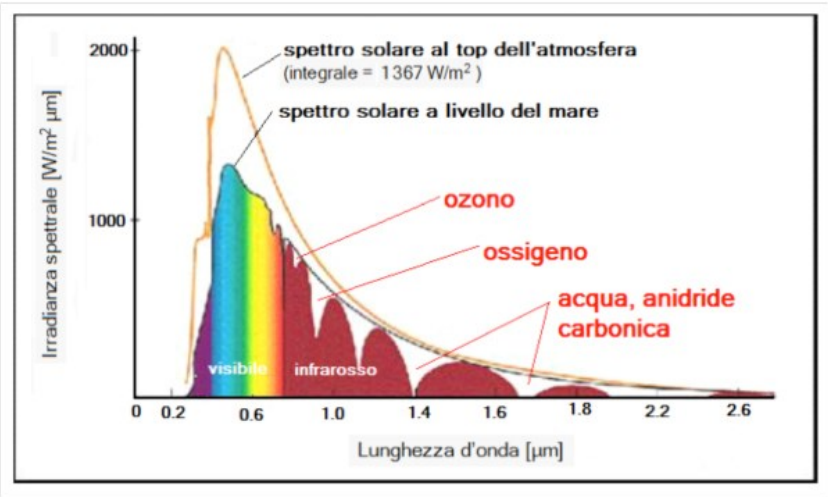

Figura 7. Spettro solare. (http://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/radiazione-solare/qualcosa-da-sapere-sul-sole-1/spettro-elettromagnetico-solare-e-assorbimento-in-atmosfera)

La parte di irraggiamento che raggiunge il suolo costituisce la radiazione diretta, la rimanente costituisce la radiazione diffusa. Va infine aggiunta la radiazione riflessa o albedo, che è la percentuale di radiazione diretta e diffusa che è riflessa da tutte

le superfici circostanti. La radiazione diretta ha componente maggiore rispetto a quella diffusa a ciel sereno, si riduce all'aumentare dell'umidità e della percentuale di cielo coperto.

Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale	1000 W/m^2	600 W/m^2	500 W/m^2	400 W/m^2	300 W/m^2	200 W/m^2	100 W/m^2	50 W/m^2
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

Figura 8. Intensità radiazione solare. (http://www.itishertz.gov.it/minisiti/solare/radiazione.htm)

La quantità di radiazione che raggiunge un piano orizzontale, è nota come radiazione solare R_s, riferita alla radiazione del sole che viaggia su onde corte, o anche nota come radiazione globale che è la somma della radiazione diretta ad onde corte e quella diffusa.

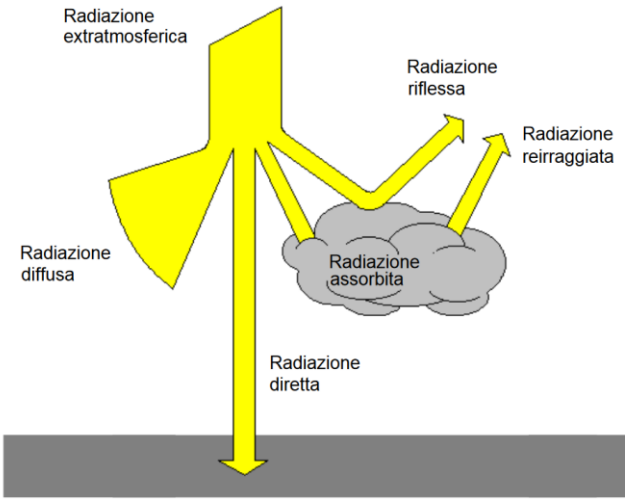

Figura 9. Componenti radiazione solare. (http://sunflowercpv.blogspot.it/2013/09/irraggiamento-solare-dni.html)

La radiazione globale ad onde corte è legata alla radiazione extra-atmosferica o anche detta radiazione al limite dell'atmosfera R_a dalla relazione:

$$R_s = \left(a_s + b_s \cdot \frac{n}{N}\right) \cdot R_a \tag{8}$$

Dove:

R_s : radiazione solare o a onda corta [MJ/m^2 d]

n: durata effettiva del sole [ore], registrata con un registratore solare Campbell Stokes

N: massima durata possibile di sole o ore diurne [ore][2]

R_a : radiazione extra-atmosferica [MJ/m^2 d]

a_s: costante di regressione, che esprime la frazione di radiazione extra-atmosferica che raggiunge la terra in un giorno nuvoloso (n=0)

a_s+b_s: frazione di radiazione extra-atmosferica che raggiunge la terra nelle giornate limpide (n=N)[3]

Questa equazione nota come formula di Angstrom, viene utilizzata qualora non si conosce, a causa di mancanza di dati, il valore della radiazione solare.

Le misure della radiazione portano in conto le radiazioni dirette e diffuse che investono una superficie orizzontale, queste misure vengono rilevate da strumenti come: solarimetri, piranometri e radiometri. Il solarimetro è usato per misurare il flusso della radiazione solare mediante l'effetto fotovoltaico. Il piranometro misura la radiazione globale, il funzionamento si basa sulla differenza di temperatura tra una superficie chiara ed una scura. Il radiometro è contenuto in un'ampolla di vetro contenente gas a bassa pressione, avente un mulinello con quattro pale. Ciascuna

---

[2] Le ore diurne sono calcolate in funzione dell'angolo orario al tramonto: $N = (24/\pi) \cdot \omega_s$

[3] Se questi valori non sono disponibili, si raccomanda as=0.25 e b_s=0.5.

con una faccia chiara e scura, nel momento in cui viene illuminato, si mette in movimento muovendosi tanto più rapidamente quanto maggiore è l'intensità.

Radiazione netta R_n

La terra ha una temperatura media di circa 300 K, emette un flusso radiante, le cui lunghezze d'onda sono superiori a quelle della radiazione solare, questo accade perché la parte della radiazione solare che è assorbita dalla superficie terrestre, ne aumenta la temperatura. A sua volta la superficie terrestre irradia con lunghezza d'onda maggiore di quella proveniente dal sole. A questo punto si definisce flusso netto della radiazione, la differenza tra la radiazione netta in ingresso che viaggia su basse lunghezze d'onda e la radiazione netta in uscita dalla superficie terrestre che viaggia su alte lunghezze d'onda. Tale flusso è positivo durante le ore diurne e negativo durante la notte. Il valore totale durante le 24 ore è quasi sempre positivo, ad eccezione delle condizioni che si hanno alle alte latitudini.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \tag{9}$$

Dove:

R_n : radiazione netta [MJ/m^2 d]

R_{ns} : radiazione netta che viaggia su basse lunghezze d'onda (net shortwave) [MJ/m^2 d]

R_{nl} : radiazione netta che viaggia su alte lunghezze d'onda (net longwave) [MJ/m^2 d]

La radiazione netta che viaggia su piccole lunghezze d'onda R_{ns} è fornita mediante un bilancio tra la radiazione solare in ingresso e quella riflessa, è la frazione della radiazione globale R_s che non è riflessa dalla superficie, bensì assorbita. La quantità appena definita è conosciuta come *albedo* r, strettamente legata alla tipologia di

superficie, all'angolo d'incidenza o pendenza. Assume valori circa unitari per superfici coperte da neve, 0.25 per terreni con copertura vegetale, e 0.23 per la coltura di riferimento.

$$R_{ns} = (1 - r) \cdot R_s \tag{10}$$

Dove:

R_{ns}: radiazione netta che viaggia su basse lunghezze d'onda (net shortwave) [MJ/m^2 d]

R_s: radiazione solare o a onda corta [MJ/m^2 d]

r : albedo o coefficiente di copertura [adimensionale]

La radiazione netta che viaggia su lunghezze d'onda maggiori R_{nl} (net longwave radiation), è riferita come detto in precedenza, alla radiazione che emette a sua volta la terra. Il bilancio radiativo per arrivare al flusso netto, è effettuato tra la radiazione a lunghezze d'onda maggiori che è assorbita dall'atmosfera o dispersa nello spazio $R_{l,up}$, e la radiazione a lunghezze d'onda maggiori ricevuta dall'atmosfera $R_{l,down}$ che incrementando la sua temperatura, permette all'atmosfera di irradiare con una propria energia. Questo fenomeno porta la terra ad emettere e ricevere radiazioni a lunghezze d'onda maggiori, la differenza tra le due è la radiazione netta $R_{nl.}$ Il flusso radiativo netto che viaggia su lunghezze d'onda maggiori, è proporzionale alla temperatura della superficie irradiata elevata alla quarta potenza, secondo la nota legge di Stefan-Boltzmann:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2}\right] \cdot \left(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}\right) \cdot \left(1.35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right) \tag{11}$$

Dove:

σ: costante di Stefan-Boltzmann [$4.903 \cdot 10^{-9}$ MJ/K^{4}m^{2}d]

$T^4_{max,K}$: temperatura massima assoluta durante le 24 ore [K]

$T^4_{min,K}$: temperatura minima assoluta durante le 24 ore [K]

e_a: effettiva pressione di vapore in [kPa]

R_s: radiazione solare misurata o calcolata mediante la (8)

R_{so}: radiazione a ciel sereno[4]

Tuttavia tale flusso radiativo è inferiore, e la legge sopra esposta deve essere corretta da due fattori come l'umidità e la nuvolosità. Il termine per la correzione dell'umidità $\left(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}\right)$, diminuisce all'aumentare di essa, mentre l'effetto della nuvolosità è espresso da: $\left(1.35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right)$, esso diminuisce all'aumentare della nuvolosità.

[4] Calcolata con la relazione: $R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a$, quando i valori calibrati di a_s e b_s non sono disponibili, z rappresenta la quota sopra il livello del mare [m].

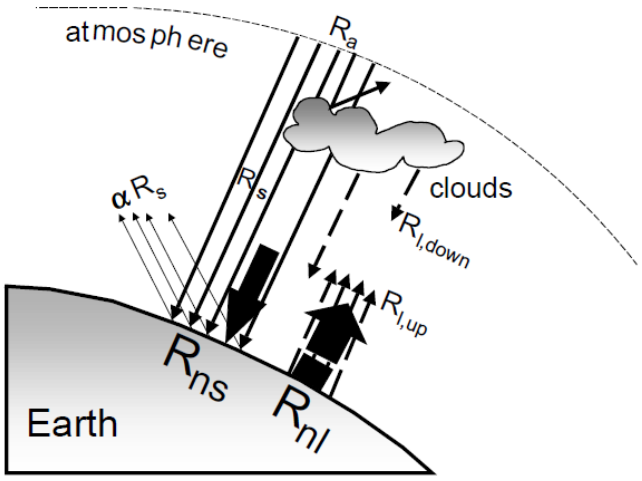

Figura 10. Componenti radiazioni solari nette. (FAO Irrigation and drainage paper 56 Crop evapotranspiration).

Flusso di calore del suolo G

Il flusso di calore del suolo è positivo quando il suolo è caldo, diventa negativo quando si raffredda. Questo flusso si porta in conto nel calcolo dell'evapotraspirazione, ma essendo un'aliquota piccola (specialmente quando la superficie è coperta dalla vegetazione) può anche essere ignorata. La definizione di tale flusso si basa sul concetto che la temperatura del suolo è assimilabile a quella dell'aria:

$$G = c_s \cdot \frac{T_i + T_{i-1}}{\Delta t} \cdot \Delta z \qquad (12)$$

Dove:

c_s: capacità di calore del suolo [MJ/m^3°C]

T_i: temperatura dell'aria all'i-esimo istante [°C]

T_{i-1}: temperatura dell'aria al tempo i-1 [°C]

Δt: lunghezza dell'intervallo di tempo [d]

Δz: l'effettiva profondità del terreno [m]

Dato che la temperatura del suolo aumenta dopo che si è riscaldata quella dell'aria e diminuisce dopo che si è raffreddata quella dell'aria, il periodo considerato dovrebbe essere più ampio di un giorno. L'effettiva profondità del suolo è di 10 o 20 cm per intervalli di tempo di pochi giorni, e può arrivare a 2 m o più per periodi mensili. La capacità del suolo dipende dalla composizione minerale del terreno e dal contenuto d'acqua, solitamente ha valori di 2.1 MJ/m^3°C. Una semplificazione della (12) per il calcolo mensile, è rappresentata dalla seguente:

$$G_{mese,i} = 0.14 \cdot \left(T_{mese,i} - T_{mese,i-1}\right) \tag{13}$$

Dove:

$T_{mese,i}$: la media delle temperature dell'aria del mese i-esimo [°C]

$T_{mese,i-1}$: la media delle temperature dell'aria del mese i-1 [°C]

Temperatura dell'aria T

La temperatura dell'aria è influenzata da diversi fattori, in primo luogo varia con l'altitudine, poiché essendo riscaldata dalla superficie terrestre ad un'altitudine bassa avremo una temperatura più alta, all'aumentare dell'altitudine la temperatura diminuisce e lo fa con una certa regolarità, si definisce un gradiente termico verticale, pari a 0.6 °C ogni 100 m. Varia con le stagioni climatiche, con i venti, con la copertura nuvolosa, con la latitudine, con l'esposizione del sole, con la copertura vegetale, e con la distanza dal mare. Le misurazioni vengono effettuate con termometri, con termografi e con stazioni metereologiche; il termometro

registra la temperatura massima e quella minima in un periodo di tempo (in genere 24 ore), il termografo rileva e riporta la temperatura istante per istante, la stazione metereologica elettronica campiona la temperatura dell'aria ogni minuto e fornisce le temperature medie orarie, e i valori della temperatura massima e minima nelle 24 ore. In genere il calcolo dell'evapotraspirazione è fatto su base mensile considerando i dati giornalieri delle temperature, definendo una temperatura media o T_{mean} come media aritmetica tra la temperatura massima e quella minima:

$$T_{mean} = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \tag{14}$$

Aria umida

L'aria umida è una miscela di aria secca e vapore d'acqua, l'aria secca è composta dal 78% di azoto, 21% di ossigeno e il restante da altri gas, mentre il vapore d'acqua è un gas che varia il suo contenuto all'interno di questa miscela. Il contenuto d'acqua nell'aria può essere espresso attraverso diversi parametri, come la pressione di vapore, la temperatura di rugiada e l'umidità relativa. La pressione di vapore saturo $e^0(T)$ è direttamente correlata alla quantità d'acqua presente nell'aria, il numero di molecole d'acqua presenti all'interno dell'aria dipendono dalla temperatura, all'aumentare di essa aumenta la capacità della miscela di contenere acqua aumentando anche la pressione di vapore saturo.

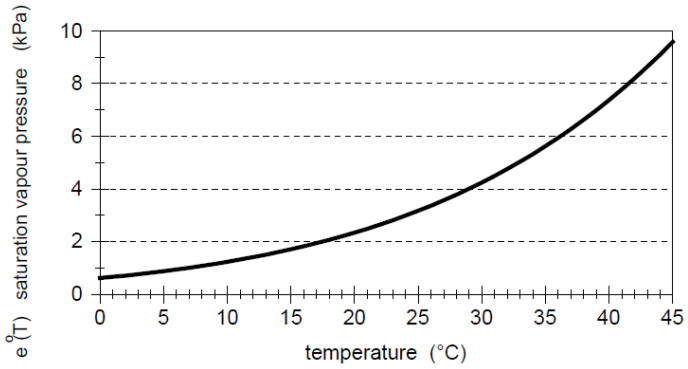

Figura 11. Relazione tra la pressione di vapore saturo e la temperatura. (FAO Irrigation and drainage paper 56 Crop evapotranspiration).

Questo legame è spiegato dalla figura 11, un parametro importante è Δ che rappresenta la pendenza della curva riportata. La pressione di vapore e_a invece rappresenta la pressione che esercita l'acqua all'interno dell'aria. Quando la pressione di vapore raggiunge la pressione di vapore saturo, si ha il cambiamento di fase, da vapore a liquido.

La temperatura di rugiada T_{dew} è la temperatura di incipiente condensazione, ossia la temperatura alla quale l'aria deve essere raffreddata per diventare satura.

L'umidità relativa *RH* espressa in %, è il rapporto tra la pressione di vapore attuale e la pressione di vapore saturo ad una data temperatura:

$$RH = 100 \cdot \frac{e_a}{e^0(T)} \tag{15}$$

Essa è misurabile mediante lo strumento "igrometro".

Velocità del vento

La velocità del vento è una misura rilevante per la stima dell'evapotraspirazione a seconda del clima in cui ci troviamo, la FAO nel quaderno numero 56 ha riportato per due differenti condizioni climatiche, un clima caldo e secco e un clima caldo e umido, la variazione dell'evapotraspirazione standard. Si nota che al variare della velocità del vento, l'evapotraspirazione varia per il clima caldo e secco, e rimane invariata per il clima caldo e umido. La velocità del vento si misura con anemometri, posti in luoghi indisturbati.

1.1.3.2. Parametri atmosferici

La pressione atmosferica è la pressione esercitata dal peso di una colonna d'aria, è noto che l'evaporazione ad un'elevata altitudine è maggiore a causa di valori bassi di pressione atmosferica, questo è l'effetto sostanziale sull'evapotraspirazione.

Ulteriori parametri che influenzano l'evapotraspirazione sono: il calore latente di vaporizzazione λ, che è la quantità di energia necessaria per far avvenire il passaggio di stato dalla fase liquida a vapore, dipendente dalla temperatura; la costante psicrometrica, che diventa costante per una data altitudine, poiché tutti i parametri dalla quale dipende possono essere ritenuti costanti ad eccezione della pressione atmosferica che non è costante, ma dipendente dall'altitudine.

CAPITOLO 2

STATO DELL'ARTE

2.1. FORMULAZIONI PER LA STIMA DI ET_0

Nella stima dell'evapotraspirazione standard, esistono in letteratura numerose formulazioni, ognuna delle quali fornisce risultati affidabili o meno a seconda del luogo e quindi del clima in cui vengono calate. Numerosi sono gli esempi, Dehghani-Sanij e altri (2004) hanno esaminato ET_0 utilizzando i modelli Penman, Penman-Monteith, Wrigth-Penman, Blaney-Criddle, un modello di bilancio radiativo e il modello di Hargreaves, evidenziando che il modello Penman-Monteith fornisce le stime più affidabili, per un clima semiarido come in Iran; mentre il modello di Penman produce le migliori stime per un clima umido-temperato. Lopez-Urrea e altri nel 2006 hanno esaminato sette modelli empirici, in un clima semiarido in Spagna, e il modello più accurato è risultato essere Hargreaves. Ma la tipologia di formulazione empirica che si adotta è anche condizionata dal corredo di dati qualitativi e quantitativi che si ha a disposizione, basandosi sulla correlazione fra uno o piu' parametri meteorologici e l'evapotraspirazione, infatti è possibile utilizzare metodi basati sulla misura della temperatura dell'aria oppure metodi basati sulla stima o misura della radiazione solare.

Differenti da quelli empirici sono i metodi combinati che tengono conto della modellizzazione fisica del processo evapotraspirativo e dell'energia richiesta per il passaggio di stato dell'acqua, oltre tutti i meccanismi che consentono la rimozione del vapore acqueo. Questi metodi considerano quindi entrambe le componenti, quella energetica e quella aerodinamica, in cui può essere schematizzato il flusso evapotraspirativo. Per quanto presentino maggiori difficoltà applicative, sia per la maggiore complessità formale sia per la dotazione strumentale che richiedono, i metodi combinati forniscono in generale stime più accurate. Infine, si deve ricordare uno dei metodi di stima dell'evapotraspirazione piu' diffusi, il metodo della vasca evaporimetrica, basato sulla semplice relazione di

proporzionalità fra l'acqua che evapora da una vasca di opportune dimensioni e il flusso evapotraspirativo.

Nella presente analisi, essendo disponibile un set di dati importante, è stato possibile utilizzare la procedura consigliata dalla FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) nel numero 56, che è l'unico metodo definito da un panel di esperti come procedura standard universalmente accettata. Tale procedura si basa sulla stima dell'evapotraspirazione standard ET_0, mediante il metodo combinato di Penman-Monteith, (ALLEN, et al., 1998).

La formulazione Penman-Monteith, oggi tanto acclarata, consigliata a livello mondiale, nasce nel 1948 quando Penman giunse al calcolo dell'evapotraspirazione da una superficie d'acqua, combinando un bilancio energetico con un trasferimento di massa, nel 1963 venne modificata per essere applicata anche alle superfici vegetali:

$$ET = \frac{1}{\lambda}\left[\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\,(R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(e_s - e_a)\,6.43\,W_f\right] \qquad (16)$$

Dove:

ET: flusso evapotraspirativo [mm/d]

λ: calore latente di vaporizzazione [MJ/Kg]

Δ: pendenza della curva che esprime la tensione di vapore saturo in funzione della temperatura [kPa/°C]

γ: costante psicrometrica [0.066 kPa/°C]

R_n: radiazione netta [MJ/m2d]

G: densità di flusso di calore nel suolo [MJ/m2d]

$e_s - e_a$: deficit di pressione di vapore dell'aria, tra la pressione di vapore saturo e la pressione di vapore [kPa]

W_f: funzione lineare del vento, definita da Penman (W_f= 1+ 0.536 u_2) con u_2 velocità del vento a 2 m dal suolo [m/s]

La validita' del metodo di Penman è stata attestata da innumerevoli prove sperimentali effettuate negli anni in differenti condizioni climatiche. La fama di tale formula è data dal fatto che i parametri necessari alla sua applicazione vengono misurati in stazioni agrometeorologiche.

Nel 1977 Doorenbos e Pruitt in seguito a diverse sperimentazioni, fecero delle correzioni alla formulazione Penman originale, giungendo alla formulazione chiamata *modificata Penman* (17). Le modifiche apportate riguardano una funzione del vento più sensibile a diverse condizioni climatiche, l'ipotesi che il flusso di calore nel suolo (G) fosse pari a zero, e la correzione dell'intera formulazione mediante un fattore che porta in conto le differenze metereologiche tra le ore diurne e notturne.

$$ET = \frac{c}{\lambda}\left[\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\,(R_n) + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(e_a - e_d)\,6.61\,W_f\right] \qquad (17)$$

Nella (17) tutti i parametri sono i medesimi della (16), ad eccezione di W_f, funzione lineare del vento, definita come W_f= 1+ 0.864 u_2. Il coefficiente c puo' essere calcolato attraverso una funzione polinomiale che tiene conto dell'umidita' relativa massima dell'aria, della radiazione solare globale, della velocita' del vento diurna e del rapporto tra la velocita' del vento diurna e quella notturna (FREVERT, et al., 1983). Questo fattore di correzione c, il cui valore oscilla intorno a 1, è importante soprattutto nelle zone costiere dove il regime dei venti presenta differenze notevoli tra il giorno e la notte.

Sempre Doorenbos e Pruitt, suggerirono di semplificare l'applicazione della metodologia Penman modificata, ponendo il fattore correttivo pari ad 1, questo ovviamente porta ad una sottostima del flusso evapotraspirativo, laddove le

differenze meteo tra giorno e notte risultano significative. Questa semplificazione è nota come formulazione *FAO Penman:*

$$ET = \frac{1}{\lambda}\left[\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\,(R_n) + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(e_s - e_a)\,6.61\,W_f\right] \tag{18}$$

Dove i parametri sono gli stessi della (17).

Tra il 1963 e il 1965, Monteith ha modificato la formulazione originale di Penman, introducendo due termini, la resistenza del manto vegetale (r_S) e la resistenza aerodinamica (r_a), la prima rappresenta la resistenza che il vapore acqueo incontra nel passare dagli stomi alla superficie fogliare; la seconda invece è la resistenza che si incontra tra la superficie della foglia e l'atmosfera (figura 12).

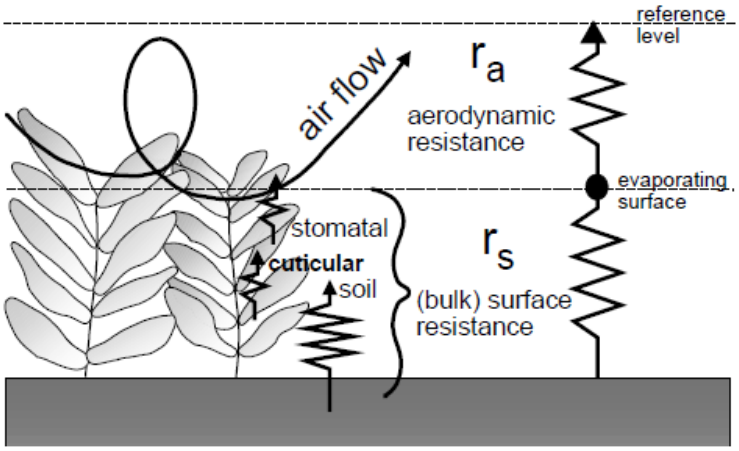

Figura 12. Resistenza superficiale e aerodinamica. (FAO Irrigation and drainage paper 56 Crop evapotranspiration).

Nella formulazione originale di Penman risiedeva una semplificazione importante, ovvero che il flusso dell'evapotraspirazione si originasse alla superficie esterna delle foglie piuttosto che negli stomi, ipotizzando che non ci fosse alcun meccanismo di controllo da parte delle piante alla diffusione del vapore acqueo. Tale relazione risulta valida quando la coltura è in condizioni di rifornimento idrico ottimale e non mette in atto quindi i meccanismi fisiologici che controllano la perdita di vapore acqueo.

Per questo motivo la formula di Penman-Monteith (P-M) è la rappresentazione più realistica, che riesce a simulare il comportamento di qualsiasi tipo di coltura in qualunque condizione di rifornimento idrico, noti i valori dei parametri di resistenza. Può essere espressa come segue:

$$ET = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta\,(R_n - G) + \rho\, c_p (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_S/r_a)} \tag{19}$$

Dove oltre ai termini già noti della (17), sono presenti:

ρ: densità media dell'aria [kg/m^3]

c_p: calore specifico dell'aria a pressione costante [kJ/kg °C]

r_a e r_S sono le resistenze succitate di seguito definite

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_z} \tag{20}$$

Dove:

r_a: resistenza aerodinamica [s/m]

z_m: altezza di misura anemometrica [m]

z_h: altezza di misura termo-igrometrica [m]

d: altezza di spostamento dal piano-zero che in genere è proporzionale all'altezza della pianta [m]

z_{om}: lunghezza della rugosità che governa l'impulso di trasferimento [m]

z_{oh}: lunghezza della rugosità che governa il trasferimento di calore e vapore [m]

k: costante di Von Karman [-]

u_z: velocità del vento all'altezza z [m/s]

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \tag{21}$$

Dove:

r_s: resistenza superficiale [s/m]

r_l: resistenza stomatica della foglia ben-illuminata [s/m]

LAI_{active}: Indice di Area Fogliare attivo (illuminato dal sole) [-]

L'indice LAI, è una quantità adimensionale, rappresenta l'area superiore della foglia per area unitaria di terreno sottostante. È espresso in m^2 di superficie fogliare per m^2 di suolo, è indice del trasferimento di calore e vapore superficiale, il suo valore cambia durante la stagione, raggiungendo il massimo prima o durante la fioritura.

La scelta di utilizzare la formulazione di P-M è giustificata da numerosi fattori, in primo luogo stima con buona precisione l'evapotraspirazione in differenti condizioni climatiche e ambientali, nasce come modello analitico con basamento fisico, e risulta essere dipendente sia da parametri fisiologici che aerodinamici che

regolano il fenomeno evapotraspirativo. Gli esperti della FAO, al fine di poter utilizzare l'equazione di Penman-Monteith quale standard nella stima dell'evapotraspirazione di riferimento, hanno stabilito le caratteristiche geometriche, morfologiche e fisiologiche della coltura di riferimento, definendo di conseguenza i valori da utilizzare per r_S e r_a. Esplicitando tutte le costanti l'equazione assume quest'ultima forma:

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \tag{22}$$

Per la definizione dei termini si rimanda al ¶1.4, in cui sono stati ampiamente discussi.

2.2. COEFFICIENTE COLTURALE K_C (SINGLE METHOD)

L'evapotraspirazione standard essendo riferita ad una coltura specifica (*festuca arundinacea*), deve essere adattata alla coltura che si vuole analizzare, mediante l'adozione di un coefficiente di correzione colturale K_c, dipendente dalla tipologia di coltura, e dal suo stadio di crescita. Il concetto del coefficiente colturale è stato introdotto per la prima volta da Jensen (JENSEN, 1968) e sviluppato in seguito, (DOORENBUS & PRUITT, 1975) ; (DOORENBUS & PRUITT, 1977) (BURMAN, et al., 1980a), (BURMAN, et al., 1980b); (ALLEN, et al., 1998). Tale coefficiente risulta essere il rapporto tra la reale evapotraspirazione del raccolto, e l'evapotraspirazione di riferimento, esso porta in conto gli effetti delle caratteristiche che distinguono le singole colture dalla coltura standard, come la copertura del suolo, le proprietà della coltura, oltre la resistenza della superficie fogliare e aerodinamica. K_c varia durante le fasi di crescita, è possibile infatti individuare quattro fasi di crescita, una fase iniziale (*initial stage*), una fase di

sviluppo del raccolto (*crop development stage*), una stagione media (*mid-season stage*), e una fase finale (*late season stage*). L'andamento del coefficiente durante le varie fasi di crescita è rappresentato dalla curva costruita mediante tre dei quattro coefficienti, $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ e $K_{c\ end}$:

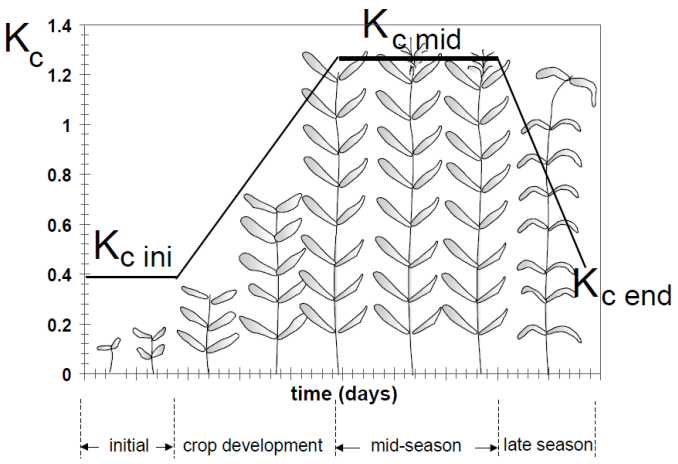

Figura 13. Andamento del coefficiente colturale. (Irrigation and drainage paper 56 Crop evapotranspiration).

La fase iniziale è contraddistinta dall'avere maggiore evaporazione rispetto alla traspirazione, perché la superficie fogliare non è ancora sviluppata, infatti quando la coltura raggiunge il 10% di copertura del terreno, rispetto al suo sviluppo totale, si passa alla fase di sviluppo. Essendo l'evaporazione importante, bisogna considerare anche la quantità di acqua fornita e la frequenza di adacquamento della superficie del suolo.

La seconda fase si estende fino a quando non si ha la totale copertura del terreno, riducendo la parte evaporativa e aumentando quella traspirativa.

Il valore massimo di K_c si raggiunge nella fase media, in questo stadio il coefficiente dipende dall'altezza media della coltura, dal valore medio di umidità relativa e dalla velocità del vento, la fase si conclude quando la coltura raggiunge la maturità.

Nell'ultima fase i parametri da cui dipende il coefficiente sono gli stessi elencati in precedenza; si osserva che il valore decresce, fino al raccolto.

Riassumendo il problema inerente il K_c, possiamo dire che tale coefficiente è necessario per la stima di ET_c, in quanto l'approccio *one-step* non è di facile applicazione. Bisogna ricordare che questo coefficiente è figlio di sperimentazioni su campo (la metodologia più diffusa è l'impiego del lisimetro), effettuate per le più comuni specie vegetali, per molte altre specie è addirittura sconosciuto; oltre al fatto che i valori tabellati sono influenzati anche dalle tecniche colturali, non sono valori puri da poter applicare in ogni condizione. Questo ci porta a dire che per un'analisi dettagliata, le misure in campo sono fondamentali, bisogna calarsi nel territorio, per analizzare nel singolo ettaro, sulla specifica coltura, il metodo impiegato per adacquare, il numero di adacquamenti e la quantità di questi ultimi.

È chiaro che le approssimazioni sono tante, ognuna con le proprie aleatorietà, e in un mondo in cui la scarsità di risorsa idrica è un tema quotidiano, il fabbisogno irriguo non può essere aleatorio, deve essere stimato con precisione.

2.3. EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE

Nota l'evapotraspirazione di riferimento ET_0, ed il coefficiente colturale K_c, è possibile valutare l'evapotraspirazione della coltura mediante l'approccio *two-steps* della metodologia FAO:

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \tag{23}$$

L'ET_c risulta dipendente dalle caratteristiche morfologiche ed ecofisiologiche della coltura: altezza, portamento, forma di allevamento, resistenza al passaggio del vapore acqueo nell'atmosfera, stadio fenologico, grado di copertura del suolo, indice fogliare, ecc.) oltre che dalle tecniche colturali (lavorazioni, densita' di impianto, tecniche irrigue adottate, gestione del suolo, ecc.).

2.4. FABBISOGNO IRRIGUO

Conosciuto in letteratura con l'acronimo CWR (*Crop Water Requirement*), come la quantità d'acqua necessaria per l'evapotraspirazione, dalla semina al raccolto, per una data coltura, in un regime climatico specifico, quando l'adacquamento è effettuato dalla pioggia e/o dall'irrigazione, senza limiti di crescita per la pianta e la resa della coltura (TODOROVIC, 2005). È facilmente intuibile che in climi aridi risulterà maggiore che in climi umidi, così come in estate risulterà maggiore della stagione invernale. Più in dettaglio è possibile definire:

- il *fabbisogno idrico colturale*, che rappresenta l'acqua di cui necessita la coltura (mm di acqua al giorno, decade o mese), calcolato sulla base della conoscenza di ET_0 e K_c, risulta quindi coincidente con ET_c;

- *il fabbisogno irriguo netto*, calcolato appunto al netto degli apporti idrici naturali;

- *il fabbisogno irriguo di campo*, calcolato sulla base del fabbisogno irriguo netto, maggiorando quest'ultimo mediante un coefficiente di efficienza irrigua, in quanto la coltura non utilizza tutta l'acqua somministratagli, che in parte si perde, in misura dipendente dalla metodologia di irrigazione applicata. Il problema si riconduce ad un bilancio idrico, che risulta essere lo stesso per la stima dell'evapotraspirazione nel bilancio idrico del terreno, trattato nel quaderno FAO 56. Nella seguente il bilancio stimato è su base giornaliera, l'incognita è il volume irriguo:

$$w = \frac{ET_c + D + R - P_n - A_f - RU}{\rho} \cdot 10 \qquad (24)$$

Dove:

w: volume idrico o fabbisogno irriguo di campo [m^3/ha]

ETc: evapotraspirazione colturale [mm/d]

D: perdite per drenaggio e percolazione [mm/d]

R: perdite per ruscellamento superficiale [mm/d]

Pn: apporti idrici naturali da pioggia, utili per la coltura [mm/d]

Af : apporti idrici naturali da falda [mm/d]

RU: apporto idrico dalla riserva idrica del suolo [mm/d]

ρ: efficienza irrigua [0.45÷0.95]

L'equazione (24) può essere anche integrata a periodi di riferimento mensili, stagionali o annuali. La precisione dipende dall'accuratezza di stima di ogni singolo termine del bilancio. I termini che incidono principalmente sono l'evapotraspirazione e la pioggia al netto dell'intercettazione fogliare:

$$w = \frac{|ET_c - P_n|}{\rho} \cdot 10 \qquad (25)$$

Essendo ρ il prodotto delle seguenti efficienze:

e_{ap} è l'efficienza di applicazione al campo

e_d è l'efficienza di distribuzione

e_a è l'efficienza di adduzione fino al distretto

L'efficienza complessiva (o rendimento) dell'irrigazione viene valutata come prodotto dei parametri, che rappresentano l'efficienza dei sottosistemi che compongono la rete: l'efficienza di trasporto, (adduzione e distribuzione) che

dipende dalle caratteristiche dei canali o dalle condotte; l'efficienza di applicazione al campo, che dipende dal metodo irriguo (scorrimento, aspersione, ecc.).

La pioggia netta è la frazione di precipitazione che effettivamente raggiunge la superficie del suolo, ovvero ridotta della quantità d'acqua intercettata dalla vegetazione. Il Dipartimento degli Stati Uniti "Soil Conservation Service" ha sviluppato una procedura per stimare la pioggia effettiva, basandosi sul processamento di serie di dati climatici e di umidità del suolo. Il metodo è noto in letteratura come USDA ed è consigliato dalla procedura FAO per la stima del fabbisogno irriguo, è stato sviluppato esaminando 50 anni di registrazioni delle precipitazioni in 22 stazioni sperimentali degli Stati Uniti, con diverse condizioni climatiche e del suolo. Per ciascun giorno è stato elaborato un bilancio idrico del suolo, aggiungendo la pioggia effettiva o l'irrigazione al bilancio del giorno precedente e sottraendo il consumo. Così facendo non vengono considerati né il tasso di umidità del suolo né l'intensità di pioggia, la pioggia effettiva risulta dipendere dalle precipitazioni totali e dal consumo mensile della coltura.

$$P_n = f_c \cdot (1.253 \cdot P^{0.824} - 2.935) \cdot 10^{0.001 \cdot ET_c} \qquad (26)$$

Dove:

Pn è la pioggia netta [mm/d]

f_c è il fattore di correzione dipendente dalla riserva idrica utilizzabile, assume il valore 1 per la condizione pedologica standard, caratterizzata da una riserva di 150 mm per metro di suolo ed una profondità radicale di 50 cm

P è il valore delle precipitazioni totali mensili [mm]

ETc è l'evapotraspirazione della coltura [mm/d]

2.5. NUOVE TECNOLOGIE A SUPPORTO DELLA GESTIONE RAZIONALE DELL'AGRICOLTURA

In ambito europeo ed internazionale si sta assistendo allo sviluppo di servizi di consulenza all'irrigazione, dalla singola particella all'intero bacino idrografico, al fine di offrire informazioni e consigli sull'utilizzo efficiente dell'acqua mediante meccanismi di comunicazione, per trasmettere l'informazione agli utenti finali quali gestori ed agricoltori (MARTIN DE SANTA OLALLA, et al., 2003). Lo sviluppo è stato sempre più agevolato dal web e dalla possibilità di accedere in tempo reale a basi di dati georeferenziati: immagini satellitari, dati agrometeorologici, dati statistici sulla distribuzione delle colture, mappe catastali ecc. (NINO, et al., 2015) Ricordiamo l'iniziativa *Farmstar* in Francia, l'iniziativa del Csro, *IrriGateway* in Australia, l'iniziativa della Nasa, *Tops Satellite Irrigation Management Support*, negli Stati Uniti. In Italia i servizi con usabilità alta che permettono stime attendibili (tabella 2), sono *Irriframe* dell'Anbi, ed il progetto *Irrisat* della Regione Campania.

I servizi di consiglio irriguo presenti sul territorio nazionale si differenziano per la metodologia di stima e per la formulazione utilizzata nel calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento. Nel caso di *IRRIFRAME*, che si basa sul bilancio idrologico, la stima dell'evapotraspirazione della coltura è ottenuta moltiplicando l'evapotraspirazione di riferimento ed il coefficiente colturale di ciascuna fase fenologica, la cui durata è stimata a partire dalle somme termiche con correzioni derivanti da osservazioni in campo. IRRISAT invece stima lo sviluppo delle colture ed i parametri per il calcolo di *ET* secondo il modello di Penman-Monteith, utilizzando dati derivanti da immagini multispettrali satellitari, l'utilizzo di dati satellitari è indicato come strumento per il monitoraggio e la salvaguardia delle risorse idriche dalla Commissione Europea (COM/2012/0673). Il consiglio irriguo effettuato da IRRISAT, di cui è ampiamente discusso in seguito, sarà oggetto di confronto nella stima del fabbisogno irriguo e del volume irriguo nel capitolo che verte sul caso studio.

Regione	Servizio/i disponibili	Note
Piemonte	Irriframe (P)	Solo CB Est Sesia e Ovest Sesia
Trentino	nessuno	
Lombardia	Irriframe (T)	
Veneto	Irriframe (T)	
Friuli VG	Irriframe (P)	Solo CB Pianura friulana
Liguria	Irriframe (T)	
Emilia Romagna	Irriframe/Irrinet (T)	
Toscana	Irriframe (P) ARSIA (T)	Irriframe solo CB 1 Toscana nord, CB 6 Toscana Sud
Marche	Nessuno	
Umbria	Irriframe (P)	Manca CB val di Chiana
Abruzzo	Irriframe (P)	Solo CB Centro
Lazio	Irriframe (P)	Manca CB Sud di Anagni
Molise	Irriframe (T)	
Campania	Irrisat (T)	
Basilicata	Irriframe (T)	
Puglia	Irriframe (T)	
Calabria	Irriframe (P)	Manca nella parte sud: CB Ionio catanzarese, CB Tirreno vibonese, CB Tirreno reggino, CB Alto Ionio reggino, CB Basso Ionio reggino
Sicilia	Irrisias (T)	
Sardegna	Irriframe (T) Irrinet Sardegna (T)	

Tabella 1. Disponibilità dei servizi di consiglio irriguo per regione (REG. (UE) 1305/2013, PROGRAMMA NAZIONALE DI SVILUPPO RURALE 2014-2020- ALLEGATO 9 METODOLOGIA DI STIMA DEI VOLUMI IRRIGUI)

Servizio	Proprietario/gestore	Metodologia di stima utilizzata	Usabilità per la stima
IRRIFRAME	ANBI	Bilancio idrologico ET_0 : HG/PM	Alta
IRRISAT	Ariespace srl	Stima da immagini satellitari ET_0 : PM	Alta
IRRISIAS	Regione Sicilia	Bilancio idrologico ET_0 : PM	Media
IRRITRE	Trentino	Bilancio idrologico ET_0 : HG	Servizio in dismissione sostituito da PICA prodotto commerciale di CAVIT solo per Vite
IRRINET Sardegna	ARPAS	Bilancio idrologico ET_0 : (?)	Media
IRRI.IT/ARSIA	Regione Toscana	Bilancio idrologico ET_0 : HG	Media/Bassa

Tabella 2. Analisi dei servizi di consiglio irriguo (REG. (UE) 1305/2013, PROGRAMMA NAZIONALE DI SVILUPPO RURALE 2014-2020- ALLEGATO 9 METODOLOGIA DI STIMA DEI VOLUMI IRRIGUI)

2.5.1. Applicazione del telerilevamento

Il telerilevamento è la scienza che permette di ottenere informazioni da oggetti posti a distanza, basandosi sulla raccolta e sull'analisi di dati senza che lo strumento usato sia in contatto diretto con l'oggetto studiato. L'approccio del telerilevamento o remote sensing, consente di acquisire caratteristiche qualitative e quantitative del territorio, è utilizzato in meteorologia, in geologia, in idrologia, ed i recenti studi stanno trovando numerose applicazioni in campo agricolo.

L'osservazione varia a seconda della piattaforma utilizzata, terrestre, aerea o satellitare, in quanto varia la distanza di osservazione che può essere prossima o estrema. Dalla piattaforma, l'acquisizione di dati avviene mediante speciali sensori che registrano le informazioni trasportate dall'energia elettromagnetica emessa, riflessa o diffusa dagli oggetti osservati, vedendo ciò che l'occhio umano non sarebbe in grado di vedere.

Nel processo di telerilevamento intervengono:

- la sorgente che è la fonte di energia che illumina o fornisce energia elettromagnetica necessaria per illuminare l'oggetto di studio, può essere la terra o il sole, oppure una luce artificiale;
- l'atmosfera che può modificare, mediante la sua composizione, la radiazione emessa dal sole;
- l'oggetto di studio, costituito da una superficie naturale, che viene investito dalla radiazione, che a sua volta può essere assorbita, riemessa o riflessa;
- la firma spettrale che è la traccia dell'interazione tra la radiazione e la superficie investita;
- il sensore che trovandosi su piattaforme è in grado di misurare e registrare l'energia riflessa o emessa dall'oggetto di studio.

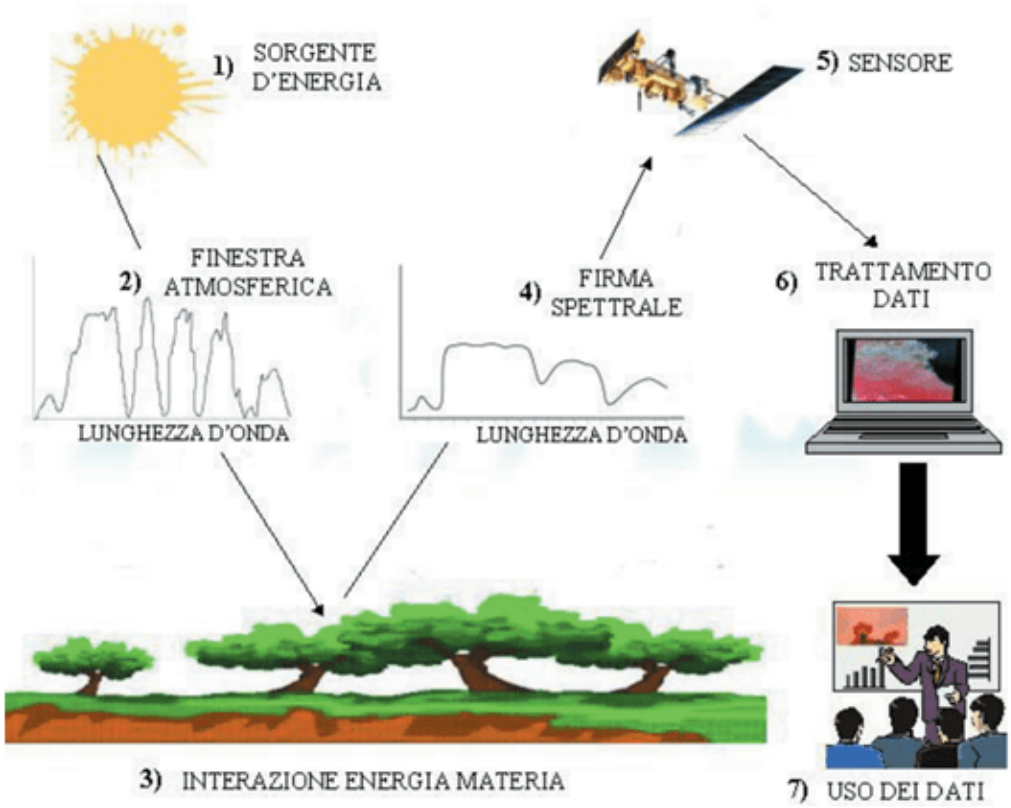

Figura 14. Processo del telerilevamento.
(http://www.ricercattiva.it/approfondimenti/come-funziona-il-processo-del-telerilevamento-o-remote-sensing/)

A valle della registrazione dei dati, questi vengono visualizzati come immagine, che viene elaborata ed interpretata per estrarne le informazioni che si vogliono ottenere. Tutte le superfici che si trovano ad una temperatura superiore allo 0° Kelvin, emettono energia sotto forma di radiazione elettromagnetica, il telerilevamento sfrutta la fisica delle onde elettromagnetiche, che si propagano per effetto del campo di forza elettrico e di quello magnetico, l'insieme di queste onde si definisce spettro elettromagnetico, ed è suddiviso in bande spettrali secondo determinate caratteristiche. Il telerilevamento utilizza la banda spettrale dell'ultravioletto o UV con lunghezze d'onda tra 0.01 e 0.4 µm, che non è percepita dall'occhio umano; la banda del visibile tra 0.4 e 0.7 µm, chiamata così poiché è la regione visibile all'occhio dell'uomo, che ha sviluppato la propria attività sensoriale in questo campo poiché il sole emette principalmente nel visibile; la banda

dell'infrarosso si colloca tra 0.7 µm e 1 mm, ed è assolutamente invisibile per l'occhio umano.

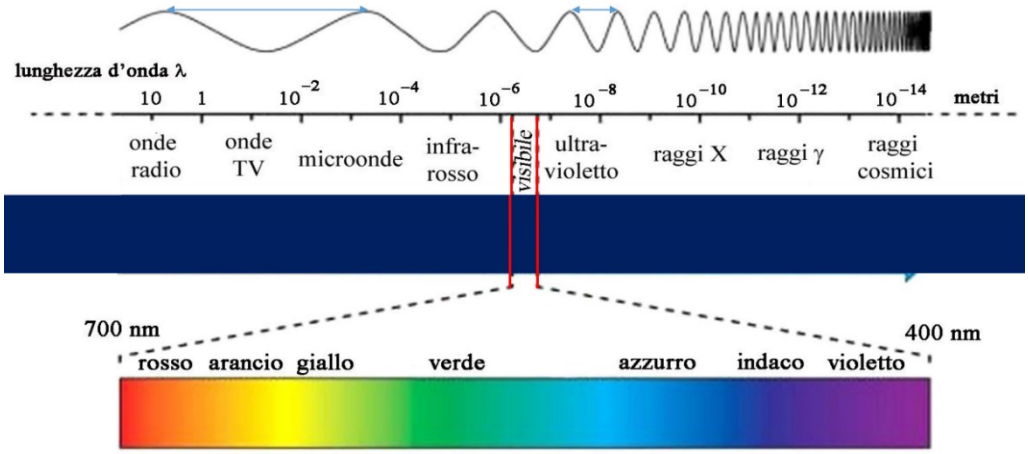

Figura 15. Spettro elettromagnetico completo. (http://www.ac-ilsestante.it/storia/2016/chimica/chimica1.htm)

Quindi ogni superficie a seconda di alcune caratteristiche, trasmette, assorbe o riflette le radiazioni elettromagnetiche in maniera differente nelle lunghezze d'onda. A seconda dell'energia riflessa, si ricava la curva di riflettanza, come frazione di radiazione riflessa rispetto quella incidente, ed è differente per ciascuna superficie, è possibile distinguere l'acqua dalla vegetazione o dal suolo, così come tutte le altre superfici, sulla base della riflettanza spettrale nelle varie lunghezze d'onda.

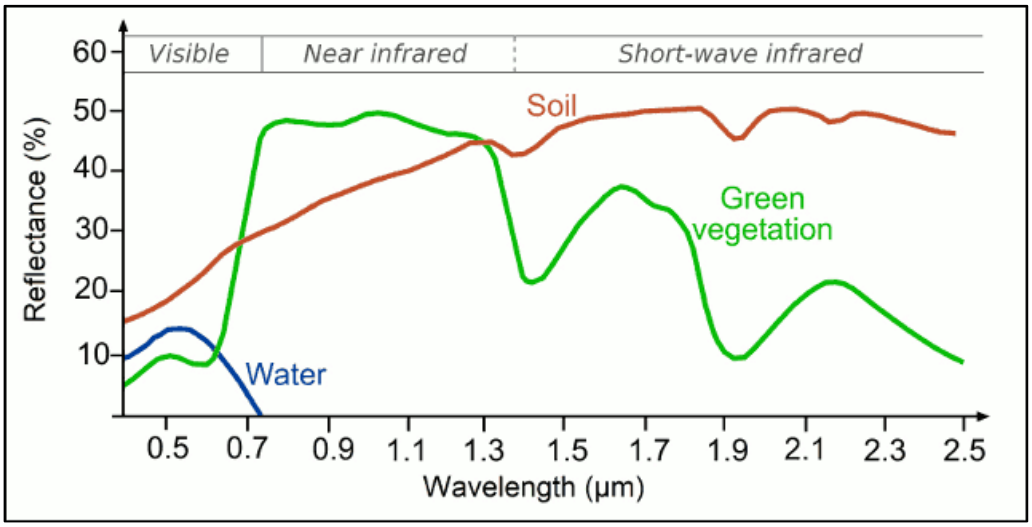

Figura 16. Curve di riflettanza. (http://www.alspergis.altervista.org/lezione/05.html)

2.5.2. Telerilevamento della vegetazione

La tecnica del telerilevamento in agricoltura, si basa sulla variabilità della curva di riflettanza della vegetazione (figura 16), questa varia in funzione del tipo di vegetazione, della densità di vegetazione, dello stadio fenologico della coltura e del suo contenuto d'acqua. La radiazione elettromagnetica emessa dal sole investe la vegetazione, costituita dal pigmento clorofilla, che assorbe la radiazione visibile blu e rossa, riflettendo quella verde, questo spiega che in estate le foglie appaiono più verdi poiché la clorofilla è maggiore, mentre in autunno la riduzione della clorofilla determina un minore assorbimento della radiazione blu e rossa, e quindi si ha una diminuzione della riflessione nel verde, con un conseguente aumento della riflessione in tutto l'intervallo *visibile*. Risulta interessante il comportamento della parte interna della foglia, della sua struttura cellulare, che invece riflette nel *vicino infrarosso* o NIR nell'intervallo tra 0.7 e 1.35 µm, ed è utilizzata per determinare lo stato di salute della vegetazione, in questa porzione di spettro una foglia sana riflette tra il 50 e il 70% di energia, il restante è riflesso nel visibile. Mentre nell'intervallo compreso tra 1.35 e 2.70 µm (*medio infrarosso*), le proprietà spettrali dipendono dal contenuto d'acqua della vegetazione, e in condizioni di stress idrico aumenta il valore di radiazione riflessa (figura 17).

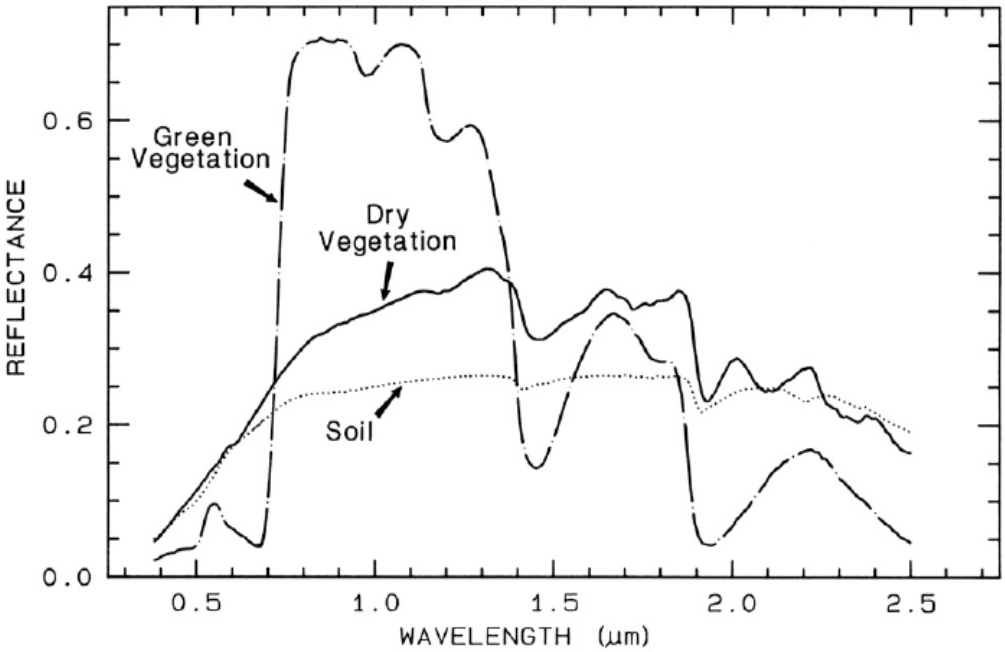

Figura 17. Riflettanza caratteristica del terreno, della vegetazione secca e verde. (BOSCHETTI, et al., 2005)

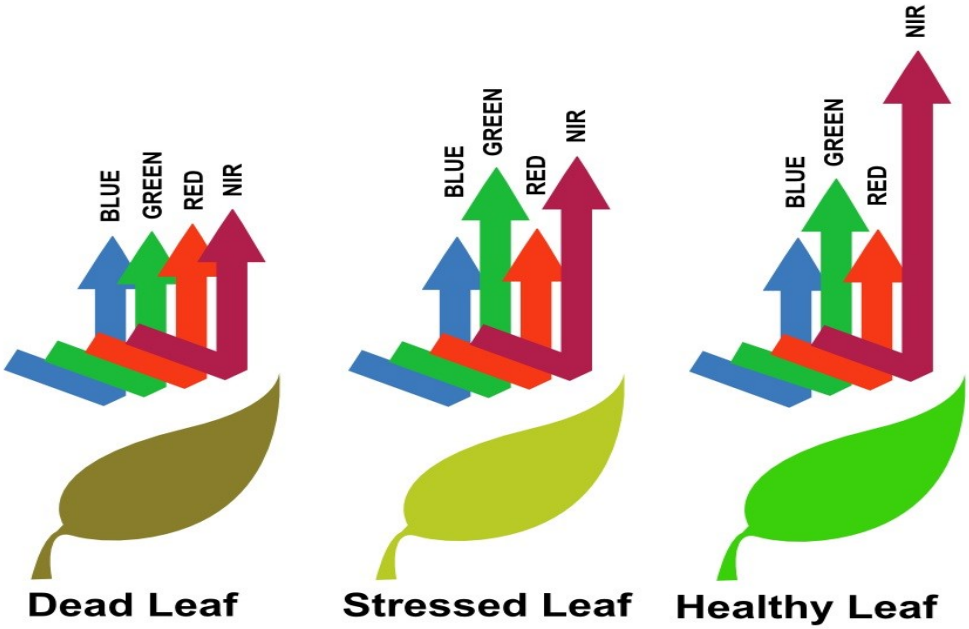

Figura 18. Riflettanza nelle bande spettrali rispettivamente per foglia morta, stressata e sana. (http://physicsopenlab.org/2017/01/30/indice-ndvi/)

Mediante operazioni algebriche tra i valori di riflettanza nelle regioni dello spettro, è possibile ricavare degli indici di vegetazione, al fine di monitorare lo stress idrico, la tipologia di coltura, l'evapotraspirazione colturale ed il fabbisogno irriguo. Esistono due categorie di indici, quelli basati sulla pendenza e quelli basati sulla distanza (JACKSON & HUETE, 1991). I primi nascono tra la risposta spettrale della riflettanza nelle bande del rosso ρ_R e porzioni del vicino infrarosso ρ_{NIR}, il più diffuso è l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \tag{27}$$

Il valore varia tra -1 e 1, è inferiore a 0.1 per terreni rocciosi e sabbiosi con vegetazione molto scarsa, raggiunge il valore unitario per vegetazione molto densa. La vegetazione sana come detto in precedenza, assorbe gran parte della luce visibile che la colpisce e riflette la maggior parte della luce del vicino infrarosso. La vegetazione malata riflette di più la luce visibile e meno la luce del vicino infrarosso, di seguito si riportano valori rappresentativi (figura 18).

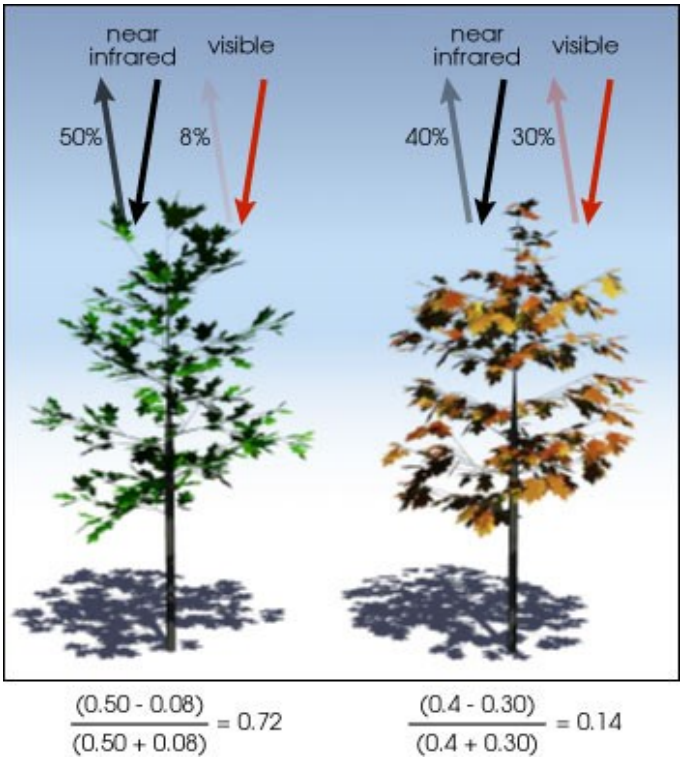

Figura 19. Valori caratteristici dell'indice NDVI.
(https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_IT/SEMXMWSWT1H_0.html)

La seconda categoria di indici di vegetazione, misurano la presenza di vegetazione mediante le differenze nei valori di riflettanza in relazione ai valori ottenuti a suolo nudo, al fine di ridurre l'influenza spettrale del suolo, come il più utilizzato WDVI (Weighted Difference Vegetation Index, Clevers 1989) stimato mediante la (25) e SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index, Huete 1988).

$$WDVI = \rho_{NIR} - \rho_R \frac{\rho_{suolo,NIR}}{\rho_{suolo,R}} \tag{28}$$

2.5.3. Fabbisogno irriguo da telerilevamento

A valle del processo di elaborazione delle immagini, è possibile ricavare la risposta spettrale della vegetazione, la riflettanza, e mediante dei metodi semi-empirici i parametri colturali albedo indicato con r e l'indice di area fogliare LAI. Ciò è possibile farlo in dettaglio, in relazione alla risoluzione del sensore satellitare, poichè l'immagine è costituita da pixel, la cui dimensione dipende dal sensore adottato, il sensore Thematic Mapper del satellite Landsat ha una risoluzione 30x30 m, i satelliti Sentinel2 sono equipaggiati con lo strumento MSI (MultiSpectral Instrument) in grado di acquisire 4 bande nel visibile e vicino infrarosso con risoluzione spaziale 10 m, 6 bande nell'infrarosso con risoluzione spaziale 20 m e 3 bande con risoluzione 60 m di cui una nel blu e due nell'infrarosso.

Ogni pixel ha per ciascuna banda spettrale del sensore valori di riflettanza che permettono di stimare l'*albedo* come somma ponderata della riflettanza spettrale ρ_λ, derivata dalla correzione atmosferica, e dei coefficienti di correzione a banda larga w_λ che rappresentano la frazione corrispondente dell'irradianza solare in ogni banda del sensore:

$$r = \sum_{\lambda=1}^{n} \rho_\lambda w_\lambda \tag{29}$$

Oltre all'indice *LAI* stimato secondo il modello CLAIR (CLEVERS, 1989), funzione logaritmica dell'indice WDVI:

$$LAI = -\frac{1}{\alpha} \ln\left(1 - \frac{WDVI}{WDVI_\infty}\right) \tag{30}$$

in cui WDVI∞ è il valore di WDVI per LAI che tende all'infinito, α è una combinazione dei coefficienti di estinzione e di diffusione della radiazione attraverso la copertura vegetale, parametro empirico stimato con misure di campo.

Stimati albedo e LAI per ogni pixel dell'area di osservazione, è possibile stimare l'evapotraspirazione colturale mediante l'approccio *one step* del metodo Penman-Monteith descritto al ¶2.1, secondo cui l'evapotraspirazione ha le seguenti dipendenze:

$$ET_c = \mathrm{f}\{r, LAI, h_c, T_a, RH, R, U\} \tag{31}$$

L'approccio standard proposto dalla FAO per la stima del fabbisogno idrico *CWR* (*Crop Water Requirement*) può essere adattato ai dati rilevati da immagini satellitari, la (25) può essere riscritta come:

$$CWR = ET_C - P_n \tag{32}$$

Dove:

CWR: fabbisogno idrico di campo [m^3/ha]

ETc: evapotraspirazione colturale stimata secondo la (19) [mm/d]

P_n: precipitazione effettiva stimata secondo la (33) [mm/d]

La pioggia effettiva può essere stimata, con l'indice *LAI* ed il coefficiente di copertura vegetativa, mediante la conoscenza degli indici di vegetazione, derivanti da immagini satellitari, secondo la (33), (BRADEN, 1985).

$$P_n = P - a \cdot LAI \left(1 - \frac{1}{a + \frac{f_{cp}}{a\, LAI}}\right) \tag{33}$$

Dove:

P: precipitazione [mm/d]

a: parametro empirico che per molte colture assume il valore di 2.88 [mm/d]

LAI: indice di area fogliare

f_c: frazione di superficie coperta dalla vegetazione

L'evapotraspirazione (ET_c o ET) si stima secondo l'approccio sviluppato da (D'URSO & MENENTI, 1995), basato sulla metodologia di Penman-Monteith riportata nel quaderno *FAO 56* (ALLEN, et al., 1998), dove non si determina il coefficiente colturale K_c ma si stima direttamente ET_c con l'approccio one step, secondo la (19). Il calcolo si basa sull'acquisizione da satellite di immagini multispettrali, che opportunamente elaborate, forniscono delle mappe dei parametri colturali *r, h_c* e *LAI* che congiuntamente ai dati meteorologici consentono di stimare ET_c, (VUOLO, et al., 2014). La conoscenza di questo valore permette di creare mappe del fabbisogno irriguo, (D'URSO, 2015).

Se si vuole a questo punto conoscere il valore di K_c, una volta ottenuto l'ET_c e conoscendo il valore di ET_0, tramite la (23):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \tag{34}$$

Inoltre qualora si voglia stimare l'evapotraspirazione colturale, con il metodo t*wo steps* utilizzando i dati satellitari, passando per il coefficiente colturale, esistono

varie formule empiriche in cui noto l'NDVI è possibile conoscere il K_c, una di queste è:

$$K_c = a \cdot NDVI + b \tag{35}$$

Dove, a e b sono derivati da osservazioni di campo, per colture erbacee a oscilla tra 1.2 e 1.5; invece b oscilla tra 0.1 e 0.2. Questo metodo presenta delle incertezze dovute alla stima dei parametri a e b, poiché sono ottenuti da osservazioni soggettive; e all'indice NDVI poiché sensibile alle condizioni atmosferiche, all'angolo di ripresa e alla risoluzione del sensore che misura la radiazione riflessa (D'URSO, 2015).

Tuttavia il metodo sopra esposto fornisce fabbisogni irrigui simili a quelli stimati con la (19) in cui *albedo* e *LAI* sono stimati da satellite, calibrando opportunamente i coefficienti a e b (AKDIM, et al., 2014).

CAPITOLO 3

CASO STUDIO CONSORZIO DI BONIFICA DEL SANNIO ALIFANO

Le metodologie di stima del fabbisogno irriguo, del volume irriguo, esposte finora, si calano sull'Italia Meridionale, nella regione Campania, nel territorio gestito dal Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano, all'interno delle piane consortili comprendenti i comuni di Presenzano, Vairano, Pietramelara e Riardo. La scelta è ricaduta sulle suddette aree consortili, in quanto gli impianti presenti, di recente ammodernamento, sono costituiti da tubazioni in pressione, con relativi misuratori di portata e volumetrici che permettono di effettuare un importante bilancio idrico ai fini del controllo e risparmio della risorsa idrica.

Figura 20. Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano, Piana Alifana.

3.1. LE FUNZIONI DEL CONSORZIO

Il Consorzio di Bonifica è un Ente Pubblico Economico amministrato da rappresentanti eletti da tutti i proprietari degli immobili che beneficiano dell'attività di bonifica idraulica e irrigazione ed è preposto alla tutela e alla valorizzazione del territorio rurale. Espleta le funzioni ed i compiti che gli sono attribuiti dalle leggi di bonifica, sia statali che regionali, e dallo Statuto dell'Ente, essenzialmente riconducibili ad una attività pubblica permanente di conservazione, valorizzazione e tutela del territorio, di razionale utilizzazione delle risorse idriche per uso agricolo e di salvaguardia dell'ambiente rurale. In sintesi, ai sensi della legge regionale n. 4/2003, gli interventi pubblici di bonifica, realizzati dalla Regione con affidamento in concessione ai Consorzi di Bonifica o realizzati dai Consorzi su concessione dello Stato e della Regione, sono:

a) la sistemazione e l'adeguamento della rete scolante, la captazione, raccolta, provvista, adduzione e distribuzione d'acqua a usi prevalentemente irrigui, nonché la sistemazione, regimazione e regolazione dei corsi d'acqua di bonifica ed irrigui ed i relativi manufatti;

b) il sollevamento e la derivazione delle acque e connesse installazioni;

c) la sistemazione idraulico agraria e la bonifica idraulica;

d) gli interventi di completamento, adeguamento funzionale e ammodernamento degli impianti e delle reti irrigue e di scolo e quelle per l'estendimento dell'irrigazione con opere di captazione, raccolta, adduzione e distribuzione delle acque irrigue;

e) gli interventi per la realizzazione degli usi plurimi delle acque irrigue, ai sensi della legge 5 gennaio 1994, n.36, articolo 27;

f) gli interventi realizzati in esecuzione dei piani e dei programmi adottati dalle Autorità di Bacino.

Costituiscono altresì interventi pubblici di bonifica gli interventi di manutenzione straordinaria nonché i ripristini delle opere di cui sopra, conseguenti ai danni causati

da calamità naturali in conformità alla legge 14 febbraio 1992, n. 185, e successive modificazioni.

In altri termini, il Consorzio partecipa, con altri Enti e Istituzioni preposte, all'esercizio di funzioni regionali per garantire sul comprensorio di competenza:

- la *sicurezza alimentare*, attraverso l'irrigazione in agricoltura;
- la *sicurezza ambientale*, eseguendo e progettando nuove opere di bonifica, a favore di un razionale sviluppo economico e sociale del territorio;
- la *sicurezza del territorio*, soprattutto in termini di rischio idrogeologico e di difesa idraulica.

3.2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano si inserisce nel territorio del Medio Volturno, il principale corso fluviale del Mezzogiorno d'Italia che nasce nel Molise alle falde del monte Rocchetta, tra i monti della Meta e, dopo circa 175 chilometri di percorso, sfocia nel mar Tirreno all'altezza di Castel Volturno. La portata media del Volturno nei pressi della foce raggiunge 98 m^3/s, mentre a valle, prima della confluenza con il Calore Irpino, è di 44 m^3/s. Il bacino fluviale sotteso è di 5570 km^2 ed è diviso in tre parti: Alto, Medio e Basso Volturno. Il corso Medio del fiume è nato a causa del sollevamento avvenuto nel Quaternario del complesso vulcanico di Roccamonfina che ne deviò il passo verso est sbarrandogli la strada verso il mare, termina alla stretta di Triflisco, nei pressi dell'antica città di Capua. Il Medio Volturno è dunque la vallata situata fra l'Appennino (a Nord monti venafrani e Matese, Taburno ad Est), il Preappennino (la piccola catena del monte Majuri o Maggiore, fra Vairano e Castelcampagnano), e l'Antiappennino (il versante Nord delle colline tifatine, che separano la vallata dalla pianura campana). La valle dal punto di vista geografico costituisce una configurazione unica, tipica delle valli fluviali, separata nettamente dai territori vicini, dalle montagne già dette, che

determinano un perfetto bacino d'impluvio. La regione della Media Valle del Volturno comprende l'estensione, secondo criteri idrografici, di un territorio già classificato da alcuni decenni e denominato "Valle del Volturno dai monti Tifatini a Presenzano". Su tale antico comprensorio si costituì, con R.D. n. 8240 del 27 ottobre 1927, il Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano, la cui superficie venne delimitata in 13.486 ettari, compresi tra i territori di pianura adiacenti al medio corso del Volturno, dalla stretta di Presenzano al ponte Annibale, ai piedi del monte Tifata. Solo nella pianura di Alife il limite territoriale si estese alle sorgenti del Torano, a Piedimonte. Sulla base di tale delimitazione si sviluppò il primo dei piani di bonifica del comprensorio, le cui opere, tuttavia, sia stradali che di sistemazione valliva e montana, necessariamente dovettero trascendere i confini posti dalla stessa delimitazione, venendo ad essere previste, in parte, anche al di fuori di essa. Allo scopo di affrontare in forma risolutiva e con criteri unitari i problemi della bonifica della Media Valle del Volturno e quelli delle zone ad essa strettamente legate, il Consorzio, nel settembre 1969, ritenne di dover necessariamente procedere alla proposta della definitiva delimitazione del comprensorio, secondo criteri di maggiore razionalità e completezza. A seguito dell'approvazione del nuovo Piano Generale di Bonifica il richiesto definitivo ampliamento intervenne con D.P.R. n. 3879 del 5/3/1971, con un'estensione complessiva pari a 59.750 ettari (prima della L.R. n. 4/2003).

Il comprensorio consortile si può dividere in due aree distinte:

- *il vecchio comprensorio* (così detto comprensorio Sannio Alifano, colore giallo della figura 21);
- *il nuovo comprensorio*, a sua volta suddiviso due zone di nuova operatività:

la prima, costituita dal comprensorio del soppresso Consorzio di Bonifica della Valle Telesina (colore verde nella figura 21); la seconda, di ulteriore espansione, ossia che si estende oltre i limiti del vecchio comprensorio del Sannio Alifano e di quello della Valle Telesina (colore arancio della figura 21), in nuovi territori

classificati di bonifica integrale, ai sensi del richiamato D.P.G.R. n. 764 del 13.11.2003.

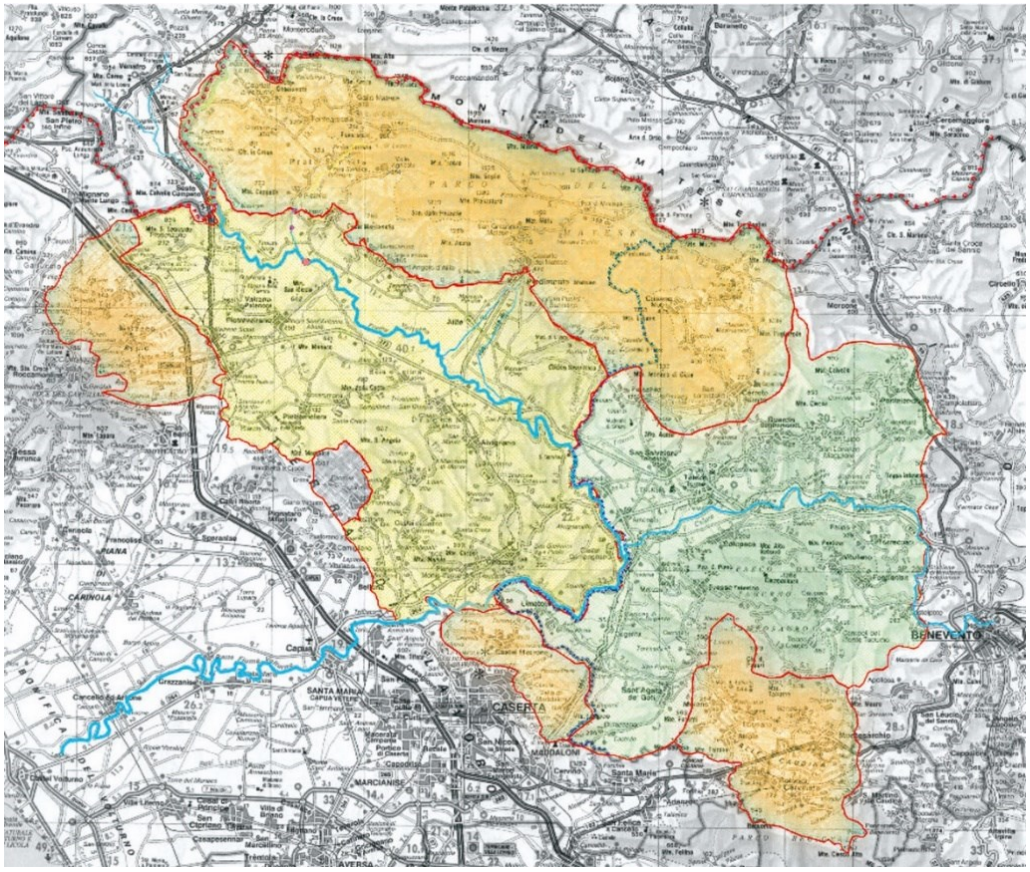

Figura 21. Inquadramento dei confini del vecchio e del nuovo comprensorio.

Il Consorzio di Bonifica Sannio Alifano ha sede a Piedimonte Matese (CE) e gestisce, a seguito dell'ultima classificazione operata dalla Regione Campania con la Legge n. 4 del 25.02.2003 e successivo D.P.G.R. n. 764 del 13.11.2003, un comprensorio di circa 195.000 ettari distribuiti nelle Province di Caserta, Benevento e Avellino, interessando in totale 82 comuni (vedi tabella 3 e figura 22).

	Provincia di Caserta	Provincia di Benevento	Provincia di Avellino	Totale
Comuni	42	37	3	82
Superficie [ha]	112.996	77.668	4.173	194.837

Tabella 3. Comprensorio del Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano

Figura 22. Regione Campania: limiti del Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano.

Per ciò che riguarda l'attività di bonifica, ad oggi il Consorzio gestisce una rete scolante di circa 838 km che si sviluppano tra la provincia di Caserta (circa 366 km)

e la provincia di Benevento (circa 472 km). Per ciò che riguarda l'attività di irrigazione, ad oggi il Consorzio gestisce diversi impianti irrigui (rete irrigua), localizzati tra la provincia di Caserta e la provincia di Benevento, che servono complessivamente circa 18.000 ettari topografici di territorio agricolo (vedi Tabella 4) grazie alla presenza di:

- reti di condotte in pressione, di diversi diametri e materiali, e canali a pelo libero sia in terra che in cemento;
- n.1 traversa sul fiume Volturno in località Mortinelle nel comune di Ailano (CE);
- n.1 opera di presa sul fiume Volturno in località Colle Torcino nel comune di Capriati al Volturno (CE);
- n.1 opera di presa sul fiume Volturno in località Fossolagno nel comune di Gioia Sannitica(CE);
- n.2 opere di presa sul Fiume Lete nel comune di Pratella;
- n. 1 opera di presa sul Rio Grassano nel comune di San Salvatore Telesino;
- n. 11 impianti di sollevamento così distinti:

1) Impianto Presenzano 1, situato nel comune di Presenzano (CE);
2) Impianto di Presenzano 2, situato nel comune di Presenzano (CE);
3) Impianto di Forma, situato nel comune di Alife (CE);
4) Impianto di Fossolagno, situato nel comune di Gioia Sannitica (CE);
5) Impianto di Gioia Sannitica, situato nel comune di Gioia Sannitica (CE);
6) Impianto di Rio Grassano, situato nel comune di San Salvatore Telesino (BN);
7) Impianto sinistra Titerno, situato nel comune di Faicchio (BN);

8) Impianto di Boscarello, situato nel comune di Sant'Angelo d'Alife (CE);

9) Impianto Fosse, situato nel comune di Alife (CE);

10) Impianto Marzanello, situato nel comune di Vairano Patenora (CE);

11) Impianto Epitaffio, situato nel comune Piedimonte Matese (CE);

- n. 1 casa cantoniera in località Fontanelle nel comune di Vairano Patenora (CE);

- n. 1 deposito in località Varco nel comune di San Salvatore Telesino (BN).

n.	Distretto	Superficie topografica [ha]
1	piana Alifana - zona alta	554,25
2	piana Alifana - zona bassa	3.109,48
3	piana Alifana - zona media	884,69
4	piana del Lete	1.193,12
5	piana di Baia Latina e Dragoni	2.088,01
6	piana di Gioia Sannitica	417,52
7	piana di Presenzano	1.160,73
8	piana di Riardo - Pietramelara - Pietravairano	3.023,81
9	piana di Vairano	1.376,27
10	piana di Fossolagno	455,80
11	piana di Telese	4.048,70
TOTALE		**18.312,38**

Tabella 4. Distretti irrigui (fonte SIGRIAN)

Lo studio effettuato in questa tesi ricade nei comuni di Vairano Patenora, Riardo, Pietramelara e Presenzano, serviti dal suddetto Consorzio, dove è stato possibile attingere ai dati necessari per le elaborazioni riportate nei capitoli che seguono, grazie al sistema di telecontrollo, di cui sono provviste le piane esaminate (figura 23).

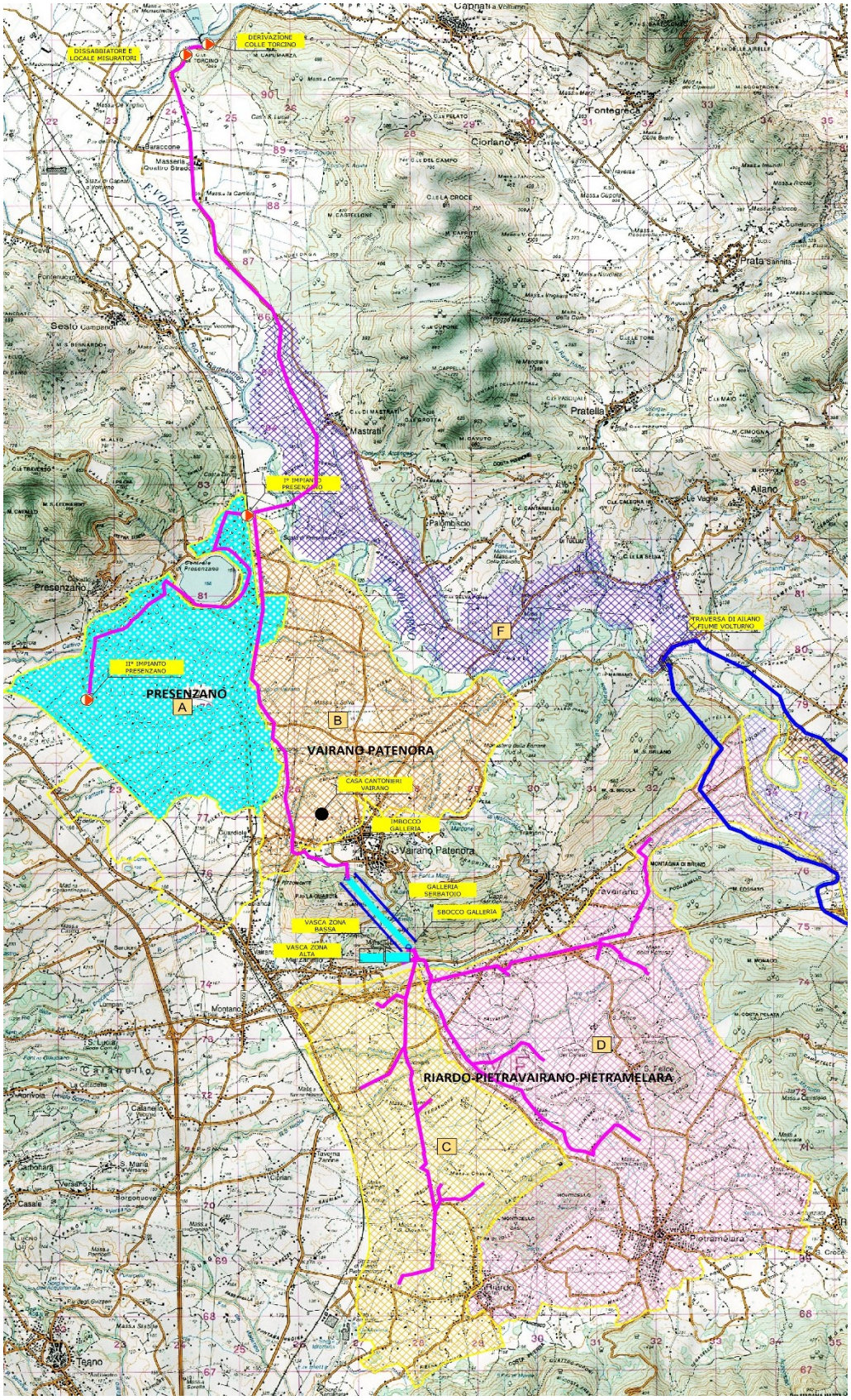

Figura 23. Aree del Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano telecontrollate.

3.4. DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI

Il Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano per l'irrigazione in destra del Fiume Volturno e, più in particolare, dei territori costituiti dalle piane di Presenzano, Vairano Patenora e Riardo – Pietramelara – Pietravairano, ha individuato come fonte di alimentazione il Fiume Volturno, dal quale è stata effettuata una derivazione di una portata di 1750 l/s in corrispondenza della esistente traversa Enel di Colle Torcino in tenimento del Comune di Capriati al Volturno, alla quota di derivazione normale 175,00 m s.l.m.. Il comprensorio irriguo è suddiviso in macro aree denominate "distretti" a loro volta suddivisi in aree omogenee dette "comizi" o "settori".

3.4.1. Impianti di Vairano Patenora e Riardo-Pietramelara-Pietravairano

L'impianto a servizio delle piane di Vairano Patenora e Riardo-Pietramelara-Pietravairano, ricadenti nel comprensorio irriguo consortile in destra del Fiume Volturno. La piana di Vairano Patenora viene servita lungo il percorso dalla condotta adduttrice-distributrice, che collega l'opera di presa di Colle Torcino con la galleria-serbatoio di monte Sant'Angelo. La piana di Riardo-Pietramelara-Pietravairano (figura 24) si divide, seguendo l'orografia del territorio in:

- *zona bassa*, la parte della piana di Riardo-Pietramelara-Pietravairano, costituita da una superficie di circa 1100 ettari, ripartita tra i distretti A, C, D, ed F, alimentata a gravità dalla galleria-serbatoio di Monte S. Angelo;
- *zona alta,* la parte della piana di Riardo-Pietramelara-Pietravairano, estesa per una superficie di circa 1530 ettari (distretti da G a P), viene irrigata previo iniziale sollevamento (in località Monte S. Angelo), dei corrispondenti volumi di adacquamento, per le maggiori quote dei terreni.

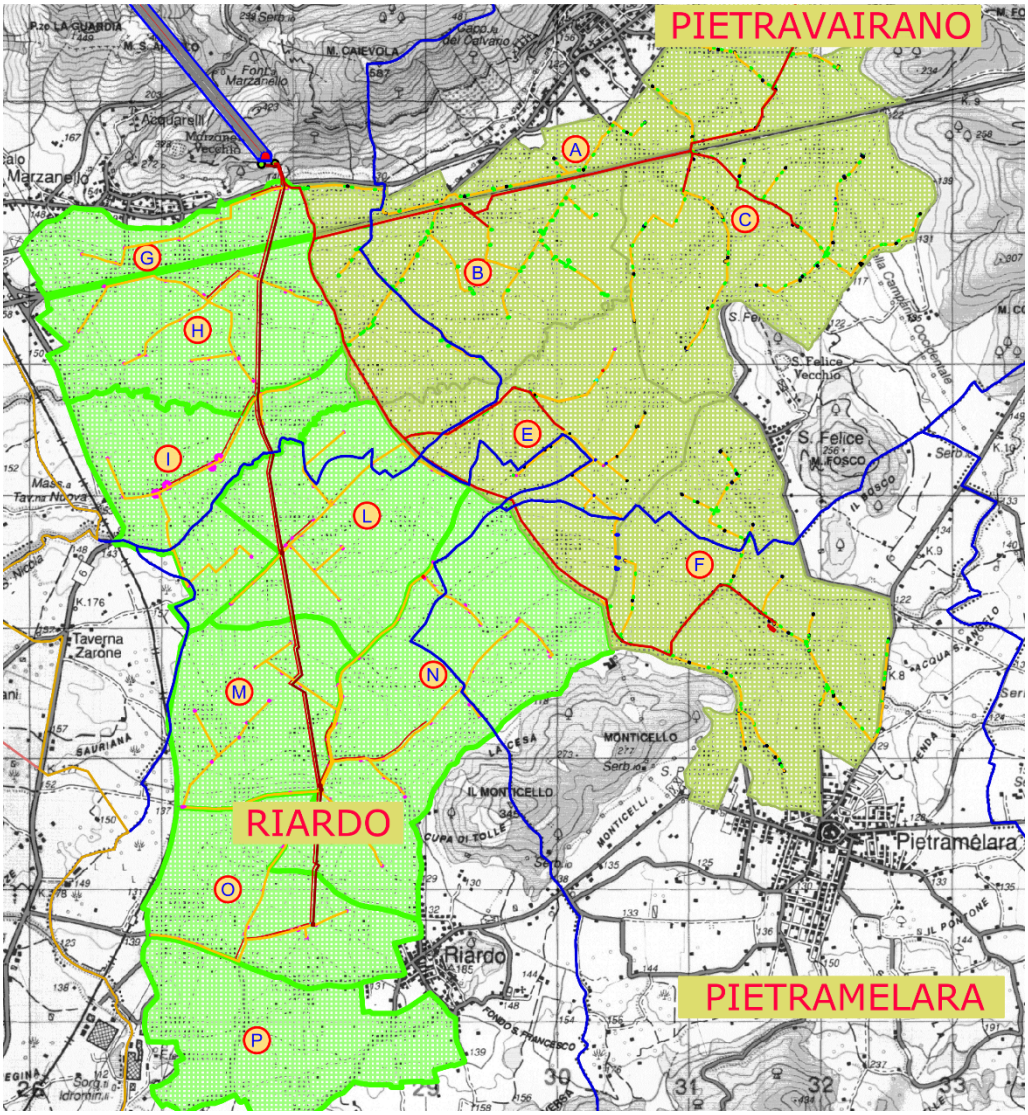

Figura 24. Distretti della piana di Riardo-Pietramelara-Pietravairano.

In riguardo all'attualità tecnologica delle condotte della rete irrigua, queste sono:

- condotte secondarie e comiziali in materiale platico (PVC) con diametri compresi tra 125 e 315 mm;
- le condotte principali in acciaio con rivestimento esterno pesante e protezione catodica continua al fine di preservare le tubazioni dalla corrosione, anche in riguardo agli effetti dei fenomeni di moto vario conseguenti a manovre delle apparecchiature idrauliche.

L'impianto irriguo è del tipo ad aspersione con rete in pressione e con distribuzione a "domanda" in cui, fermo restando il vincolo di non poter prelevare una portata maggiore del modulo assegnato, si lascia agli utenti la libertà di effettuare la bagnatura dei campi in orari ed in tempi non obbligati. Ciò premesso e facendo riferimento al periodo di punta, si riportano di seguito i valori dei principali parametri irrigui assunti a base del dimensionamento dell'impianto:

- dotazione continua nelle 24 ore di 0,2792 l/s · ha;
- modulo di 10 l/s.

Il valore del modulo di 10 l/s è stato assegnato a superfici di ampiezza massima di 9 ha topografici. Per proprietà con superfici maggiori, sono stati assegnati multipli di 10 l/s secondo lo schema:

Superficie [ha]	Modulo [l/s]
da 9 a 25	20
da 25 a 35	30
da 35 a 47	40
da 47 a 50	50

Tabella 5. Modulo irriguo per superficie

Dove poi esiste un forte frazionamento delle proprietà si è considerato l'accorpamento delle medesime per formare utenze (comizi) servite dal corpo d'acqua di 10 l/s. La portate di dimensionamento delle condotte primarie e secondarie sono state stimate con l'applicazione del metodo probabilistico di Clement-Marchetti applicato alle singole sezioni delle condotte stesse; la portata di dimensionamento delle singole reti comiziali resta, invece, fissata nel valore di 10

l/s in quanto su ciascun gruppo di consegna è stato previsto un apposto limitatore di portata. L'intero sistema di condotte è stato, inoltre, dimensionato in modo da ottenere sugli idranti, in generale, una pressione non minore di 2 atm.

L'organizzazione della rete irrigua procede, secondo un preciso ordine gerarchico, attraverso tre ordini di condotte, appresso elencate in ordine decrescente di importanza:

- condotte primarie, che adducono l'acqua sino alla testa dei distretti;
- condotte secondarie, che, in derivazione dalle condotte primarie, provvedono a trasportare l'acqua all'interno di ciascun distretto fino ai gruppi di consegna dei singoli comizi;
- condotte comiziali, che, articolandosi all'interno del comizio, provvedono a recapitare l'acqua sino ai punti di consegne aziendali; detti idranti di consegna sono disposti ad una distanza media di circa 60 m ed in maniera da consentire l'impiego di ali piovane mobili della lunghezza massima di 200 m.

Più precisamente occorre dire che tale dislocazione è stata adottata in tutte le zone dove esiste un forte frazionamento della proprietà fondiaria, per cui non sarebbe stato altrimenti possibile consentire l'agevole uso dell'acqua ad ogni singolo utente. Al contrario, nelle parti del territorio irriguo in cui risulta prevalente la presenza di medie e grandi aziende, la progettazione delle reti comiziali è stata piuttosto rivolta a diradare la distribuzione degli idranti sul campo, con una densità media di 1,5÷2 idranti per ettaro, in accordo con la recente grande diffusione, già in atto nel comprensorio, degli irrigatori semoventi. A tal proposito si vuole sottolineare come la portata specifica all'idrante di 10 l/s sia sufficiente a garantire un buon funzionamento dell'impianto sia nel caso si adoperi l'ala piovana mobile con batteria di irrigatori sia nell'impiego di irrigatori semoventi.

La velocità dell'acqua nelle tubazioni è stata mantenuta, di norma, nel campo di valori (0,7÷ 1,3 m/s) usuali per la tipologia delle condotte adottate e per l'uso cui le stesse sono destinate.

Completano lo schema idraulico un impianto di sollevamento, interposto, in località "Monte S. Angelo", tra la vasca "Bassa" e la vasca "Alta", la vasca di aspirazione delle pompe è alimentata dalla vasca "Bassa" mediante un canale in cemento armato di larghezza pari a 1.00 m.

La vasca di compenso "Alta" di forma poligonale, con larghezza di base massima di 16.20 m e lunghezza di 35.0 m, ha quota del fondo pari a 179.10 m mentre la quota di sfioro è fissata a 185.60 m, risultando quindi un tirante idrico massimo pari a 6.50 m. Lo scarico di superficie è costituito da una tubazione in acciaio DN 500 che recapita nella vasca "Bassa" con sbocco a quota 164.4 m; la presa di fondo, invece, è costituita da una tubazione in acciaio DN 1000 con testa tubo coincidente con il fondo vasca a quota 179.10 m.

Da tale vasca, in corrispondenza di un pozzetto di manovra, si diparte una tubazione DN 500 che assolve la funzione di scarico di fondo; nello stesso pozzetto è inoltre alloggiata una valvola di eccesso di flusso (valvola di ipervelocità) che interrompe l'alimentazione in caso di rottura nella rete a valle.

Il volume di compenso della vasca "Alta", pari a 3.300 m^3, è la differenza tra i volumi di compenso relativi all'intera piana di Vairano e Riardo ed i volumi di compenso della galleria e del manufatto di sbocco. Difatti, premesso che la dotazione giornaliera media e la superficie topografica totale risultano rispettivamente pari a 0,2921 l/s · ha e 1352,60 ha per la piana di Vairano e 0,2792 l/s · ha e 3.108,55 ha per quella di Riardo, risulta:

- V_{tot} = 1,14 [(0,2921 x 1352,6) + (0,2792 x 3108.55)] x 8 x 3,6 = 41.600 m^3;
- $V_{galleria+imbocco}$ = (1870x15.30) + (10.00x4.90x3.60) = 28.800 m^3;
- V_{vasca} Vairano= 5.800 m^3;
- V_{vasca} "bassa" = (3932/3.80) x 3.60 = 3.700 m^3;
- V_{vasca} "Alta" = 41.600 – 28.800 – 5.800 – 3700 = 3.300 m^3

Con tale distribuzione dei volumi di compenso gli 11.580 m^3 da allocare nell'impianto "zona alta", per 8.280 m^3 (11.580 – 3.300) sono da sollevare dalla vasca "Bassa" nel periodo di punta; questo è garantito, potendo l'impianto di sollevamento anche funzionare contemporaneamente con due pompe da 390 l/sec con una portata massima (di punta) di 780 l/sec, in caso di vasca vuota. Il dislivello geodetico da superare risulta compreso tra 15.95 m (vasca "Bassa" piena e vasca "Alta" vuota) e 23.60 m (vasca "Bassa" vuota e vasca "Alta" piena). Con riferimento all'inizio dell'esercizio irriguo (vasca piena), il volume totale W_T da erogare nelle 24 ore risulta pari a:

W_T = S x d x 86.400 = 1440 x 0.2792 x 86400 = 34.737 mc

mentre il volume accumulato nella vasca " Alta" è pari a 3.300 mc; tale volume può assorbire le punte orarie garantendo una portata media nelle 16 ore pari a:

Q = 3300 / (16x3600) = 57.3 l/s

Tale impianto è asservito all'irrigazione dei distretti da G a P della piana di Riardo – Pietramelara – Pietravairano denominata "zona alta" con portata continua richiesta nelle 24 ore pari, al più, a 465 l/s.

L'impianto di sollevamento, come già detto, è stato dimensionato per una portata di punta di 780 litri l/s ed una prevalenza di 24 m.

La stazione di sollevamento sarà equipaggiata con 4 (quattro) pompe che immetteranno acqua in una vasca di accumulo di 3300 m^3 denominata "Vasca Alta", distante circa 50 metri dalla predetta stazione di sollevamento. La vasca di pompaggio sarà alimentata a gravità da una vasca contigua, denominata "Vasca Bassa", della capacità di 3932 m^3. Le elettropompe prescelte sono del tipo sommergibile con piede di accoppiamento e tubi guida, sono state dimensionate per una prevalenza di 24 m: due hanno una portata di 390 l/s e due 190 l/s, assicurando, in tal maniera, un'ampia riserva in caso di malfunzionamenti, pari a circa il 50% sulla portata di punta.

Le pompe di maggior portata sono alimentate da un inverter e un softstart da 160 kW. Le altre due da un inverter e un softstart da 75 kV.

La vasca di pompaggio che ospita le pompe sommergibili ha dimensioni e caratteristiche geometriche ottimizzate per tale scopo.

L'acqua è sollevata nella vasca di compenso e carico denominata "Vasca Alta", tramite una condotta in acciaio DN 1000 ed è derivata per l'utilizzo irriguo, tramite una condotta dello stesso tipo e diametro. Su detta condotta, in prossimità dell'impianto, è presente una valvola di sicurezza a farfalla con contrappeso ed un misuratore di portata di tipo elettromagnetico.

Condotte primarie

Le condotte primarie a servizio del comprensorio della piana di Riardo–Pietramelara–Pietravairano sono quelle che collegano, la vasca di compenso alle varie prese distrettuali fino a quella terminale del distretto "O".

Condotte comiziali

Il percorso tra il manufatto di consegna comiziale e l'idrante più lontano della rete risulta mediamente della lunghezza dell'ordine dei 500 metri. Ciò posto e considerate le caratteristiche progettuali della rete delle condotte comiziali (portata costante di 10 l/s e diametro unico di 125 mm in PVC, DN 10) risulta una perdita di carico unitaria di 10, 97 m/km e quindi una dissipazione massima di energia nel comizio valutabile mediamente in 5 metri.

Ad ogni modo è stato verificato per ogni comizio che, sottraendo le perdite di carico in rete al carico idraulico disponibile alla consegna comiziale, si ottiene un carico residuo all'idrante sempre maggiore delle 2 atmosfere minime imposte da progetto.

Opere d'arte minori

Comprendono le opere d'arte tipo di linea e per apparecchiature e quelle per attraversamenti di strade e fossi:

- pozzetti di scarico, sfiato e bocche di introduzione, queste ultime limitatamente alle condotte con diametro maggiore di 800 mm;
- manufatti di presa comiziale:
- pozzetti di idrante;
- pozzetti di presa distrettuale e per le apparecchiature di linea disposte nei nodi di diramazione principali della rete di condotte.

Gli attraversamenti di strade, sono realizzati con blocco di calcestruzzo a protezione del tubo in quanto la viabilità interessata riguarda strade provinciali, comunali e poderali.

Gli attraversamenti di fossi, per le condotte con diametro maggiore o pari a 350 mm, sono realizzati con soglia a raso e blocco di cls a protezione della condotta; soltanto per le condotte di diametro inferiore, qualora l'attraversamento sia localizzato in corrispondenza di manufatti esistenti, si è previsto l'attraversamento aereo, disponendo le tubazioni agganciate alle strutture.

3.4.2. Impianto di Presenzano

Inizialmente l'impianto era alimentato dal Rio S. Bartolomeo, in seguito poi alla realizzazione dell'opera di presa a Colle Torcino, è stato realizzato il collegamento idraulico delle opere primarie del nuovo schema irriguo della piana di Vairano all'esistente impianto ad aspersione della piana di Presenzano che comportò la disponibilità di maggiori carichi idraulici e, quindi, la necessità di adeguare l'impianto di sollevamento esistente alla nuova quota piezometrica.

L'impianto irriguo è del tipo ad aspersione con rete in pressione e con distribuzione "a domanda", i parametri irrigui assunti a base del dimensionamento dell'impianto sono:

- dotazione idrica unitaria, continua nelle 24 ore, riferita al periodo di punta, pari a 0,30 l/s per ettaro;

- orario giornaliero di esercizio irriguo di 16/24 ore;
- corpo d'acqua o modulo di 10 l/s;
- ampiezza media dei comizi di 11,09 ettari

L'impianto di sollevamento che era inizialmente dotato di quattro elettropompe centrifughe, di cui una di riserva, che, in aspirazione dalla sottostante vasca di carico, provvedevano al sollevamento della portata di 235 l/s ciascuno fino al vicino torrino di carico, vincendo un dislivello geodetico di circa 42 metri.

In base a quanto successivamente fu stabilito, la portata complessiva destinata all'alimentazione irrigua della piana di Presenzano fu notevolmente ridotta (da 700 a 390 l/s); inoltre, i calcoli idraulici eseguiti sulla condotta adduttrice-distributrice principale nel tratto compreso tra l'opera di presa e l'impianto di Presenzano 1, hanno consentito di determinare un carico residuo di circa 170,00 m s.l.m. in corrispondenza dell'impianto medesimo.

Ciò comportò, di conseguenza, la sostituzione di tutte le principali apparecchiature elettromeccaniche presenti nell'impianto, mantenendo invece praticamente immutate le opere civili. Per il collegamento idraulico dell'impianto di sollevamento all'adduttore principale proveniente dall'opera di presa di Colle Torcino fu realizzato un tronco di condotta in acciaio DN 1000 mm, posto in derivazione della suddetta condotta (in acciaio del DN 1600 mm), con arrivo nel vano sottostante al piano di appoggio delle pompe. Queste, in numero di quattro, furono direttamente collegate a tale collettore e presentano caratteristiche di funzionamento, in termini di portata e prevalenza geodetica, rispettivamente pari a 130 l/s e 13 metri ciascuna. Dal torrino di carico parte la tubazione principale in acciaio DN 1000 di 6020 m, sia distributrice che adduttrice, che collega il torrino ad una seconda vasca di compenso di 20000 m^3 posta a 179.30 m s.l.m. Il volume accumulato nella suddetta vasca viene rilanciato nuovamente per servire ulteriori comizi posti a quota superiore.

3.4.3. Sistema di telecontrollo

Gli impianti sopra descritti sono attrezzati con un sistema telecontrollato, che permette da remoto di monitorare la quantità di risorsa idrica utilizzata da ogni utente, quindi i volumi irrigui adoperati per soddisfare lo sviluppo delle colture presenti nel territorio. In basso è possibile vedere un caratteristico gruppo di consegna comiziale (dotato di telerilevamento) a servizio di più utenti, posizionato all'inizio della rete comiziale.

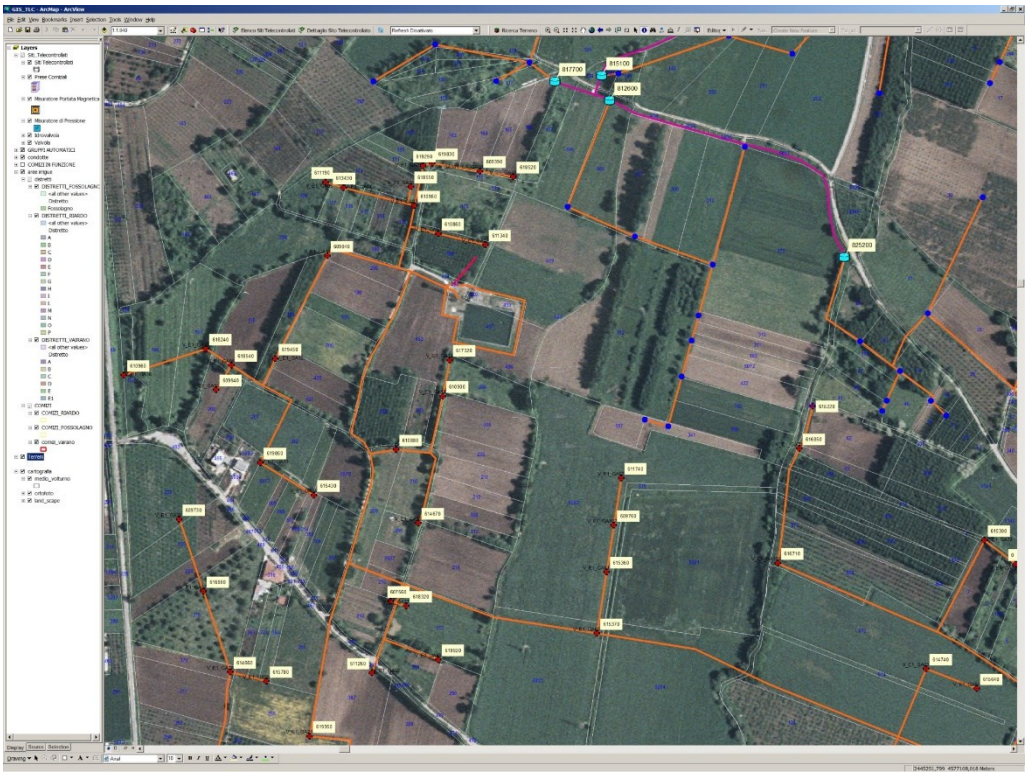

Figura 24. Rete di distribuzione telecontrollata (in celeste i gruppi di consegna comiziali).

Figura 25. Gruppo di consegna comiziale.

Il sistema di consegna mediante tessera elettronica, è costituito dal gruppo di consegna comiziale (figura 25), dalla tessera elettronica di prelievo, dall'interfaccia di programmazione, dalla tessera elettronica polivalente e dal software gestionale. Il gruppo di consegna è costituito da una componente idraulica monoblocco e da una scheda elettronica, la componente idraulica consiste di un contatore a trasmissione magnetica, con mulinello tangenziale, dotato di emettitore di impulsi e di un'idrovalvola comandata da un'elettrovalvola (solenoide ad impulsi), munita di comando manuale e di un filtro a dito autopulente a protezione del circuito idraulico, la scheda elettronica a microprocessore è dotata di memoria non volatile. La stessa, mediante il solenoide, gestisce l'apertura dell'idrovalvola e nel contempo raccoglie gli impulsi emessi dal contatore. L'alimentazione è assicurata da una batteria al litio a lunga durata (10-15 anni). Il gruppo di consegna, idoneo a servire fino a 12 utenti, è attivato da questi ultimi mediante inserimento, in apposita sede, di una tessera elettronica. Tali tessere sono fornite in dotazione a ciascun utente previa programmazione presso la sede del Consorzio, in questa fase la tessera

dell'utente viene personalizzata con l'inserimento del nome e cognome del medesimo e codificata sul gruppo di consegna sul quale si intende abilitarla al prelievo. Si provvede quindi a caricare il volume di acqua richiesto dall'utente o compatibile con le disponibilità della risorsa. Vi si fissano parametri relativi a massimo volume-tempo per ciascuna irrigazione, valori che l'utente può successivamente variare, solo riduttivamente, in occasione di ogni intervento irriguo, per evitare di ritornare in campo per por fine al medesimo. Si stabiliscono turni ed ora corrente in funzione dei turni-orari predetti. Ciascuna tessera viene abilitata a funzionare su un ben definito gruppo di consegna o più gruppi relativi allo stesso utente. Un display del quale è munita consente di rilevare in qualsiasi momento la disponibilità di acqua residua ed i valori degli altri parametri di programmazione (volume e/o tempo massimo previsto per ciascun intervento irriguo, la successione dei turni e l'orario relativo per l'intera stagione irrigua, ecc.). L'attivazione del flusso idrico ha luogo introducendo la tessera elettronica di prelievo nell'apposita sede prevista sul gruppo di consegna. Durante l'erogazione la tessera può essere estratta dal gruppo di consegna. L'arresto del flusso idrico è ottenibile tramite la reintroduzione della tessera elettronica di prelievo nella sede del gruppo di consegna, per esaurimento del volume e/o tempo previsto per l'intervento irriguo, per esaurimento della disponibilità.

La tessera elettronica polivalente è prevista ad uso esclusivo del Consorzio ed oltre a consentire l'accesso alla memoria della scheda elettronica del gruppo di consegna, permette tutta una serie di controlli relativi alla regolare funzionalità del gruppo di consegna.

3.5. TIPOLOGIE DI COLTURE E METODOLOGIE IRRIGUE ADOTTATE

Le tipologie di colture presenti nella parte di comprensorio analizzata, sono in prevalenza mais, erba medica, ortaggi e specie arboree.

L'erba medica è una pianta che resiste bene a climi aridi e secchi, la sua peculiarità nel rispondere egregiamente alle irrigazioni e le sue proprietà nutrizionali, la portano ad essere molto coltivata nelle nostre zone. Per stabilire quando sia il momento di irrigarla e i quantitativi d'acqua per ogni adacquamento, è bene valutare il fabbisogno idrico della coltura. Trattandosi di una coltura pluriennale, si fanno più raccolti nella stagione irrigua, uno dei momenti più adatti per l'irrigazione è quello dopo lo sfalcio, poiché la pianta necessita di notevoli contenuti d'acqua per ristabilire la copertura vegetale. Eccessive irrigazioni sono causa di un rapido deperimento della pianta con conseguente diradamento delle radici a favore delle infestanti, per questo motivo si tende, a mantenere la coltura in condizioni di stress idrico, facendo meno raccolti nella stagione irrigua, mantenendo la sua permanenza nel terreno più a lungo. Il metodo di distribuzione dell'acqua che viene quasi sempre utilizzato è l'aspersione.

Il mais è una delle colture che risponde in maniera soddisfacente alle irrigazioni, aumentando il numero di spighe per pianta e diminuendo il numero di piante sterili per ettaro. Questo si ripercuote in un maggiore produzione in termini di granella (mais da granella) e in termini di insilato (mais da insilato). Qualora il fabbisogno idrico di questa coltura non sia soddisfatto, ciò che può derivarne in termini di resa della pianta, dipende dalla fase di crescita in cui si trova. In particolare manifesta poca sensibilità alla carenza idrica nella fase iniziale della crescita, poiché l'espansione delle radici è ancora ridotta, mentre ne risente di più nella fase di fioritura, dove si subiscono le maggiori perdite in termini qualitativi e quantitativi.

Gli ortaggi, richiedono durante l'estate e i periodi di prolungata siccità di regolari e frequenti annaffiature. Gli adacquamenti vanno praticati a intervalli regolari, alcune specie richiedono anche irrigazioni giornaliere. Tutti gli ortaggi coltivati in filari, posti a una distanza fissa, possono essere irrigati con sistema ad infiltrazione

laterale (anche se nell'ambito del comprensorio analizzato la tecnica che viene usata è quella ad aspersione, avendo efficienze maggiori).

Le specie arboree, vengono coltivate in molti stati nelle zone con clima temperato mite**,** l'irrigazione per queste specie è indispensabile, con essa viene fornita la quantità di acqua necessaria e sufficiente a soddisfare le esigenze durante il ciclo di sviluppo. In primavera-inizio estate per le varietà precoci si necessita di un quantitativo maggiore di risorsa idrica che risulta abbondante anche nella fase di fioritura, per poi diminuire fino all'indurimento del nocciolo, aumentando durante l'accrescimento del frutto e diminuendo ancora dopo la raccolta seppur continua, per favorire l'accumulo di sostanze di riserva. La tipologia di irrigazione utilizzata è quella a goccia, trattandosi di piante pluriennali.

Tra le piane analizzate quella in cui prevale l'erba medica è la piana di Riardo-Pietravairano-Pietramelara, segue la piana di Vairano e in minima parte quella di Presenzano (figura 26). La piana in cui prevale il mais è quella di Vairano, a seguire la piana di Presenzano e in fine la percentuale più bassa di mais viene coltivata nella piana di Riardo-Pietravairano-Pietramelara (figura 27). Per quanto riguarda la presenza di ortaggi sono quasi alla pari in termini percentuali le piane di Vairano e Riardo-Pietravairano-Pietramelara, mentre Presenzano si ferma al 7% del coltivato (figura 28). Lo stesso discorso fatto per gli ortaggi si ripete per le specie arboree, solo che in questo caso la percentuale della piana di Presenzano sale al 13% del coltivato (figura 29). In termini di superficie coltivata la maggiore estensione è dovuta alla piana denominata Riardo-Pietravairano-Pietramelara, segue quella di Vairano ed infine quella di Presenzano (figura 30).

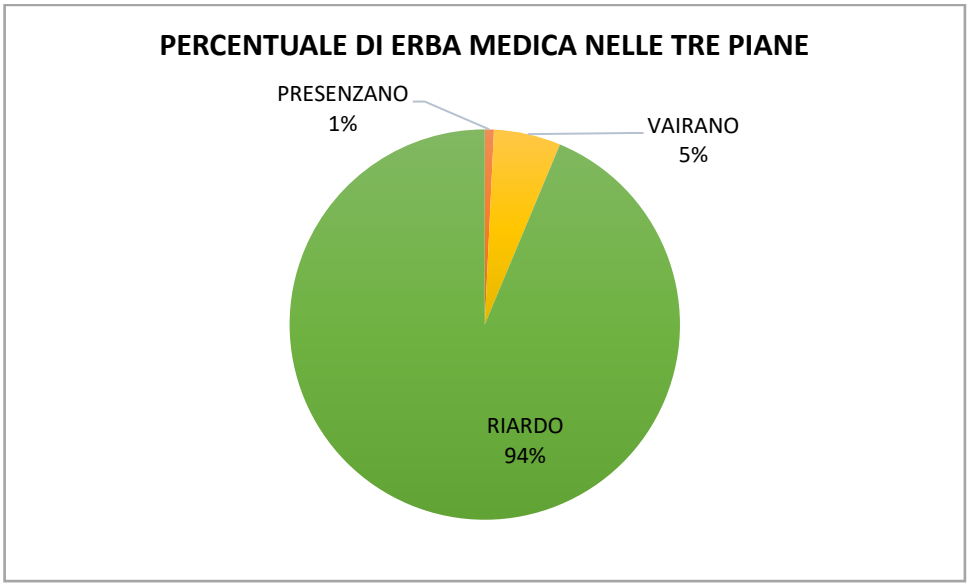

Figura 26. Percentuale di erba medica.

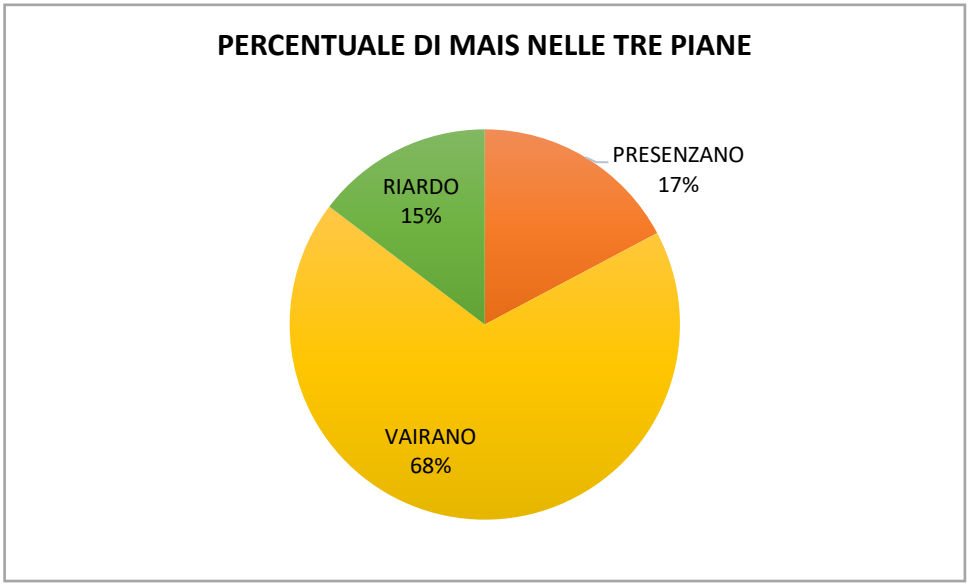

Figura 27. Percentuale di mais.

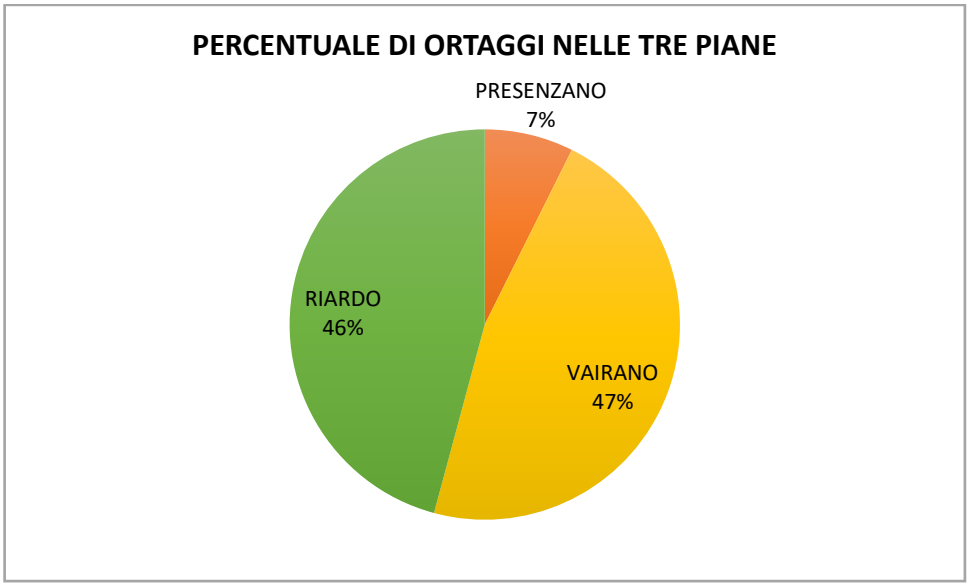

Figura 28. Percentuale di ortaggi.

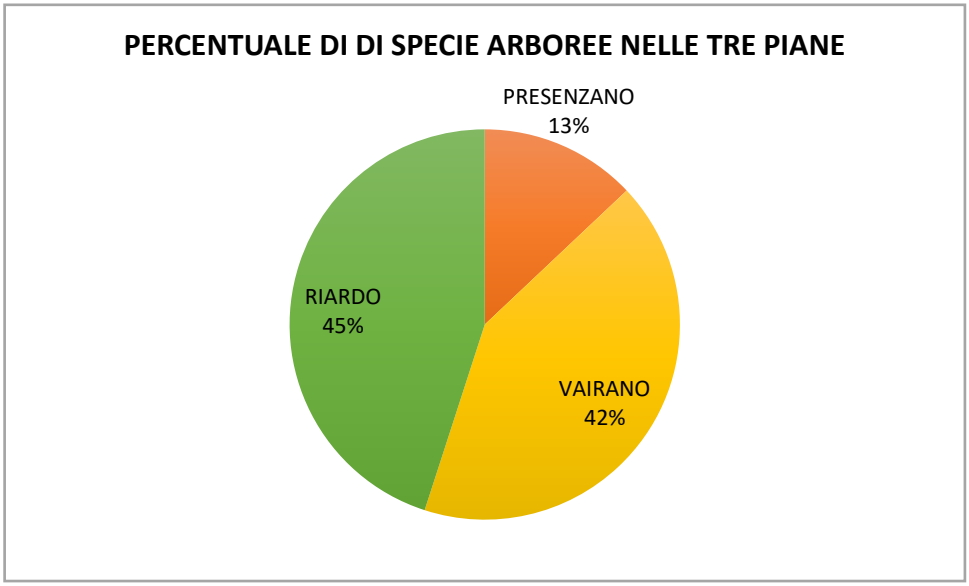

Figura 29. Percentuale di specie arboree.

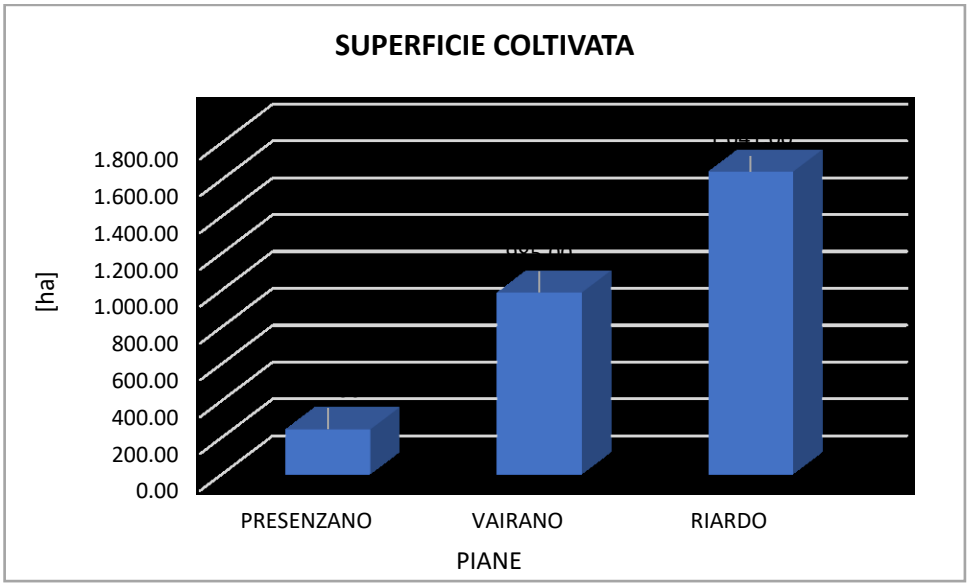

Figura 30. Superficie coltivata per ogni piana.

Le colture sopra citate necessitano di periodici adacquamenti, specialmente nella stagione estiva, la distribuzione dell'acqua può essere effettuata seguendo diverse tecniche, ossia diversi sistemi di irrigazione. Le piane oggetto di studio sono servite da impianti in pressione, che spingono verso tipologie di irrigazione ad alta efficienza. Tra i sistemi in pressione per la pratica irrigua quelli utilizzati sono ad *aspersione o a pioggia*, dove l'acqua viene somministrata alle colture dall'alto e investe l'intera superficie di terreno e *a goccia*, in cui l'acqua viene erogata in gocce attraverso dei fori posti sulla tubazione (in genere in materiale plastico) in piccole quantità, ma in maniera quasi continua. Le tipologie di irrigazione adottate dipendono fortemente dalla coltura a cui vengono applicate, in particolare per il mais, l'erba medica e gli ortaggi viene impiegata un sistema ad aspersione, mentre per le specie arboree viene impiegato un sistema a goccia. Questa particolare distinzione viene fatta dagli utenti, poiché le specie arboree sono una coltura di durata pluriennale, per cui l'impianto viene realizzato in corrispondenza della semina e perdura per l'intero ciclo di vita della coltura, effettuando controlli periodici di funzionamento dello stesso (occlusione degli ugelli erogatori, ecc.). Mentre per le altre specie coltivate, gli utenti prediligono un'irrigazione ad aspersione, poiché ritengono oneroso il montaggio e lo smontaggio degli impianti

annualmente, in quanto dopo il raccolto il terreno deve essere preparato per la semina successiva.

3.6. FOCUS AZIENDALE

Lo studio effettuato a larga scala sulle piane del comprensorio irriguo, si arricchisce di un focus effettuato a scala di particella, per due tipologie di utenze, che hanno effettuato domanda irrigua presso il Consorzio. Una ricade nella piana di Vairano Patenora, di 5.44 ha coltivati a mais, con tipologia di irrigazione ad aspersione. La durata del ciclo vegetativo è stata di 130 giorni, con semina il giorno 20 Aprile 2017 e raccolta il giorno 18 Agosto 2017 (figura 31);

Figura 31. In arancio la particella coltivata a mais.

L'altra ricade nella piana di Presenzano, ha un'estensione di 0.4631 ha in cui è stata coltivata l'erba medica, mediante una tipologia di irrigazione ad aspersione. La durata del ciclo vegetativo è di circa 4 anni (coltura pluriennale), con circa 3 raccolti effettuati durante la stagione irrigua (figura 32).

Figura 32. In rosso la particella coltivata con erba medica.

I dati forniti dal Consorzio, inerenti ai volumi erogati, in merito alle due particelle, permettono di affinare i confronti con i volumi idrici stimati mediante la metodologia analitica (ALLEN, et al., 1998), e quelli stimati mediante la tecnica del telerilevamento, i cui dati sono stati forniti dallo spin-off ARIESPACE s.r.l.

3.7. IL PROGETTO IRRISAT

IRRISAT è il servizio di consulenza per l'irrigazione basato sulla distribuzione quasi in tempo reale di prodotti EO (Earth Observation), operativo in Campania dal 2007. Il progetto nasce dalla collaborazione dello spin-off ARIESPACE s.r.l. (Academic Research and Investigations of Environment from SPACE) dell'Università Federico II di Napoli con il Consiglio Nazionale delle Ricerche, finanziato dalla misura 124 Health Check del PSR Campania 2007/2013, sperimenta la tecnica di telerilevamento al fine di ottimizzare la risorsa idrica utilizzata in agricoltura in piena applicazione della Direttiva Quadro in materia di Acque dell'Unione Europea (2000/60/CE), mediante immagini multispettrali da satellite, caratterizzate da elevata risoluzione spaziale.

La Regione Campania dal 2008 ha attivato in via sperimentale un servizio di assistenza irrigua basato sull'impiego di dati satellitari e di tecnologie dell'informazione, denominato "Piano Regionale di Consulenza all'Irrigazione", grazie all'ausilio di IRRISAT attivo dal 2011, è possibile: verificare l'accuratezza della stima del fabbisogno irriguo monitorando i volumi somministrati in relazione alla resa del raccolto; individuare e prevenire abusi nell'utilizzo della risorsa; individuare le aree irrigate senza autorizzazione e ridurre i controlli ed i sopralluoghi in campo (BOLOGNESI, et al., 2017). Inoltre IRRISAT è utilizzato come strumento da supporto per l'emissione dei contributi per il reale consumo idrico, essendo conforme all'art. 3 del D. M. MIPAAF del 31 luglio 2015.

La piattaforma si basa su una tecnologia che combina le immagini satellitari di Landsat 8 con risoluzione 30x30m, Sentinel 2 (10x10m), Deimos-1 (22x22m) e Rapid Eye (6x6m) con le previsioni meteorologiche ad elevata risoluzione spaziale e temporale (ERA INTERIM), permettendo di visualizzare mappe dei fabbisogni irrigui giornalieri, a partire dall'ultima irrigazione effettuata e con una previsione fino a cinque giorni successivi. Il sistema permette di effettuare analisi sullo stato della coltura e sui dati meteo (evapotraspirazione, irrigazione, pioggia, temperatura, indici di vegetazione), fornendo per via telematica indicazioni sui volumi irrigui e

sulla durata dell'irrigazione a livello di particella. Si base sull'acquisizione di immagini satellitari ad alta risoluzione elaborate entro 24/48 ore dall'acquisizione.

Essendo un processo di telerilevamento, consta di alcune fasi operative:

- Monitoraggio dello sviluppo colturale (LAI) mediante l'analisi di dati nello spettro del visibile e del vicino infrarosso da satelliti ad alta risoluzione;
- Acquisizione di dati agrometeorologici da reti di stazioni;
- Elaborazione dei dati per la stima dei fabbisogni irrigui attraverso l'uso di modelli fisici;
- Integrazione dei dati in un Sistema Informativo Territoriale (SIT) per le pratiche irrigue fino a scala aziendale;
- Trasmissione dei dati all'utente finale attraverso sistemi di telecomunicazione (sms, posta elettronica, pagine web personalizzate).

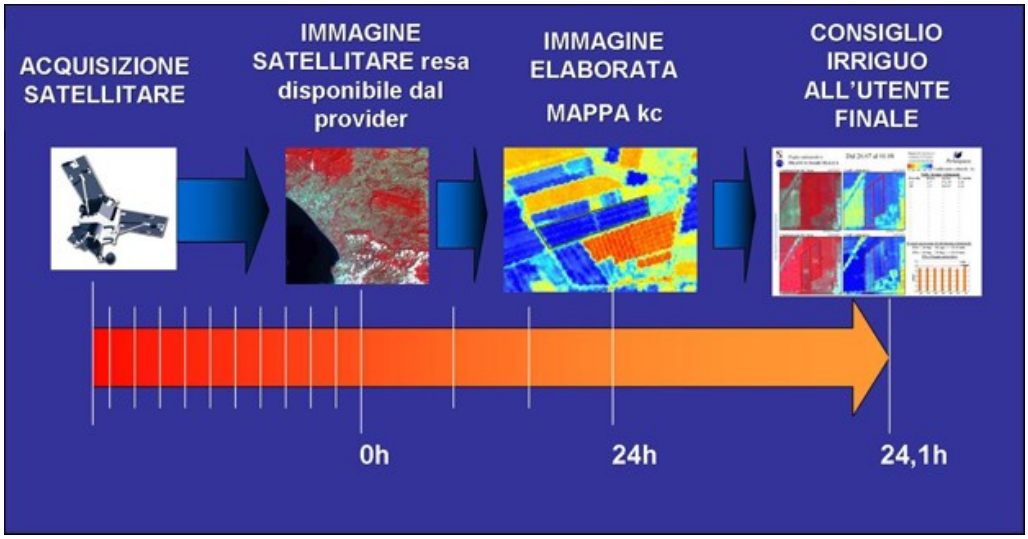

Figura 33. Processamento dei dati alla base del consiglio irriguo (www.irrisat.it).

Il progetto nasce con l'obiettivo di fornire il *consiglio irriguo*, gli utenti a capo delle aziende ricevono con cadenza settimanale il consiglio irriguo personalizzato mediante un semplice sms, inoltre in dettaglio mediante MMS o posta elettronica,

è inviata un'immagine satellitare in cui si evidenzia l'andamento del coefficiente colturale K_c per la singola particella e i dati meteo (figura 34). Inoltre ogni azienda può accedere ad una dashboard da un normale browser (accessibile mediante un semplice tablet), per analizzare in tempo reale le condizioni del raccolto. Al consorzio gestore della risorsa è dedicato un sistema web-gis specifico, nel quale è possibile monitorare la situazione della specifica azienda ed i fabbisogni complessivi di ciascun distretto irriguo.

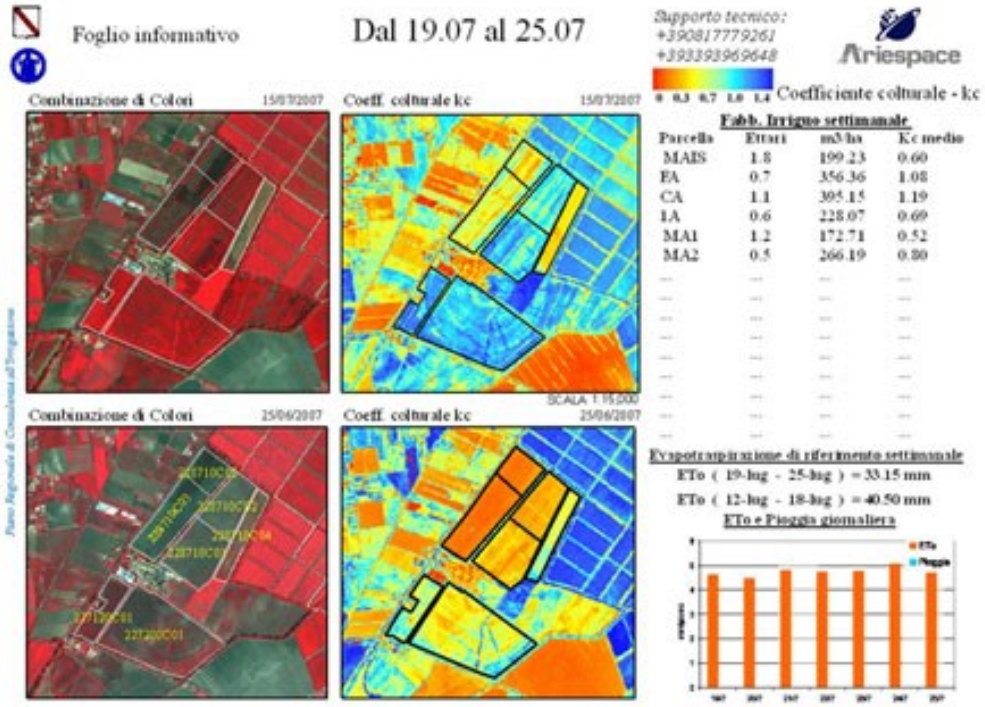

Figura 34. Foglio informativo di campo inviato tramite posta elettronica (www.agricoltura.regione.campania.it).

A tal proposito il Consorzio ha concesso l'accesso al sistema web-gis dedicatogli, dal quale è stato possibile visualizzare, per le aziende campione (descritte nel paragrafo 3.6), l'indice NDVI, l'ETc e il fabbisogno irriguo. In basso nelle figure che seguono, si riporta la mappa dell'indice NDVI e l'evapotraspirazione colturale delle suddette aziende, nella stagione irrigua 2017.

La coltura erba medica, nel mese di Maggio presenta un indice NDVI medio per tutta l'estensione della particella di 0.9 (figura 35a), successivamente nel mese di Giugno inizia a ridursi fino a raggiungere un valore di 0.5 (figura 35b), per toccare il valore minimo nel mese di Luglio di circa 0.3 (figura 35c), per poi arrivare nuovamente ad un valore di picco nel mese di Agosto pari a circa 0.9 (figura 35d). Questo andamento si presume sia dettato dal fatto che quando l'indice NDVI è alto con una colorazione verde intenso, la vegetazione è molto densa, mentre quando l'indice è basso con colorazione tendente al giallo, la vegetazione è scarsa. Tutto ciò può essere correlato ai raccolti che sono stati effettuati (circa 3), poiché a valle del raccolto il terreno è quasi privo di vegetazione (figura 35c), mentre quando la coltura è al massimo sviluppo il terreno è totalmente coperto dalla vegetazione (figura 35d).

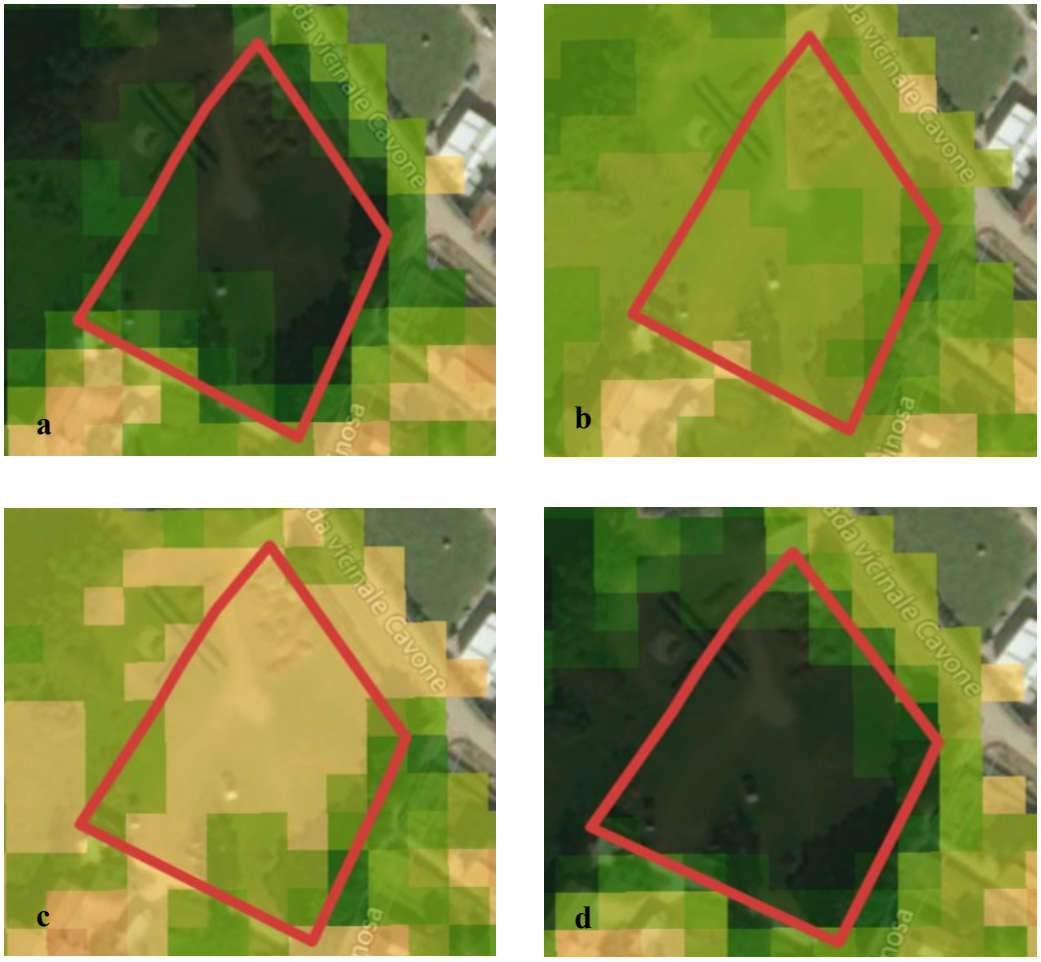

Figura 35. Mappa dell'indice NDVI, per l'azienda che coltiva erba medica rispettivamente nei mesi di Maggio (a), Giugno (b), Luglio (c), Agosto (d).

Per il mais l'andamento dell'indice NDVI è differente, si può notare che alla semina (figura 36a) il terreno è privo di vegetazione e l'indice è circa 0.08 con colorazione gialla, successivamente allo sviluppo della coltura, la vegetazione inizia ad intensificarsi con l'indice NDVI che raggiunge valori prossimi all'unità con colorazioni verde intenso (figure 36b,c,d), si nota infine come sia possibile individuare la data del raccolto, osservando la mappa NDVI, poiché l'indice raggiunge nuovamente valori prossimi allo zero con colorazioni gialle (figura 36e).

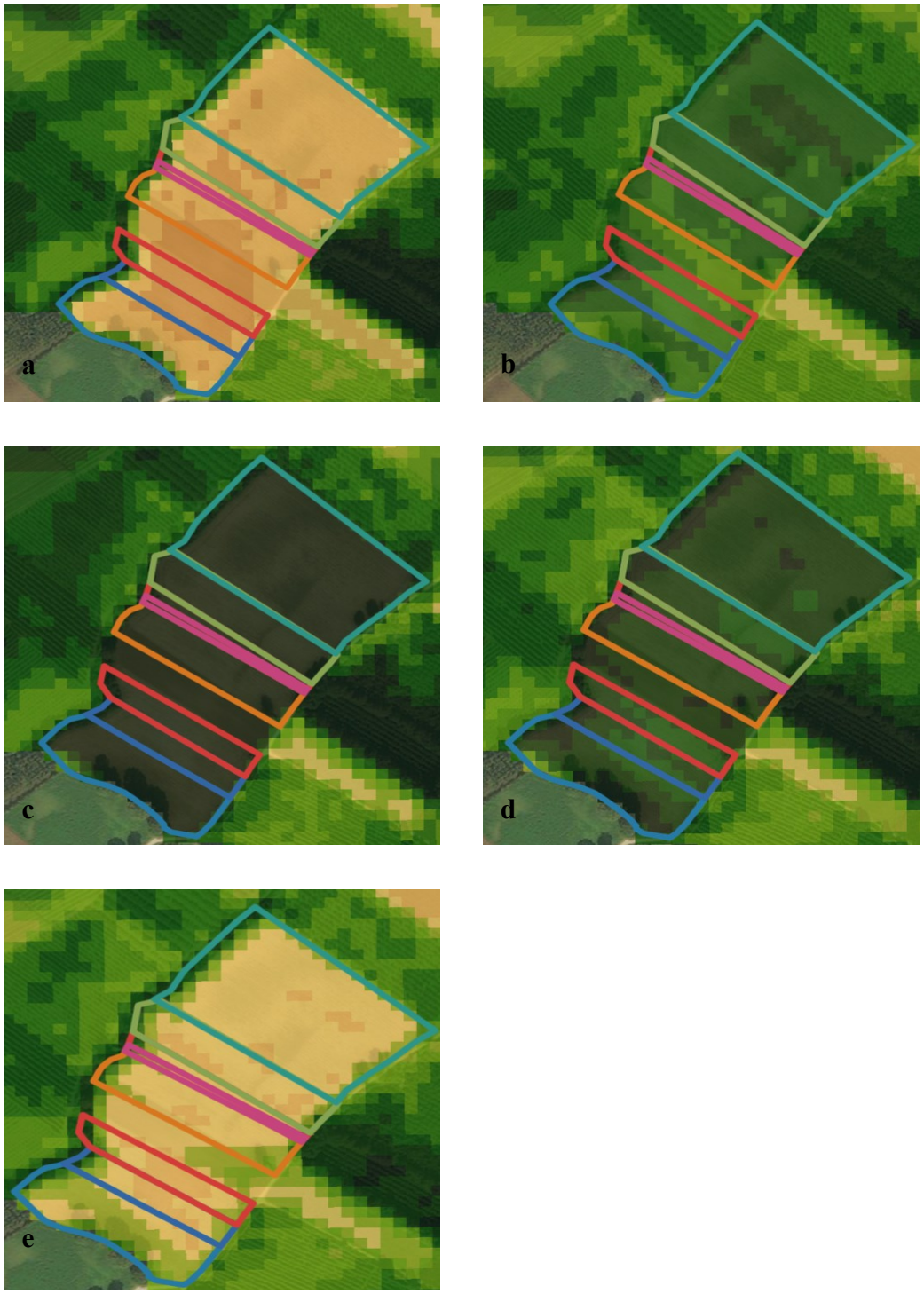

Figura 36. Mappa dell'indice NDVI, per l'azienda che coltiva mais rispettivamente nei mesi di Maggio (a), Giugno (b), Luglio (c), Agosto prima del raccolto (d), Agosto dopo il raccolto (e).

L'andamento dell'NDVI (figure 37-38) è paragonabile all'andamento del coefficiente colturale K_c, questa dipendenza è stata già evidenziata nella (35), in cui vi è una diretta proporzionalità tra il K_c e l'NDVI.

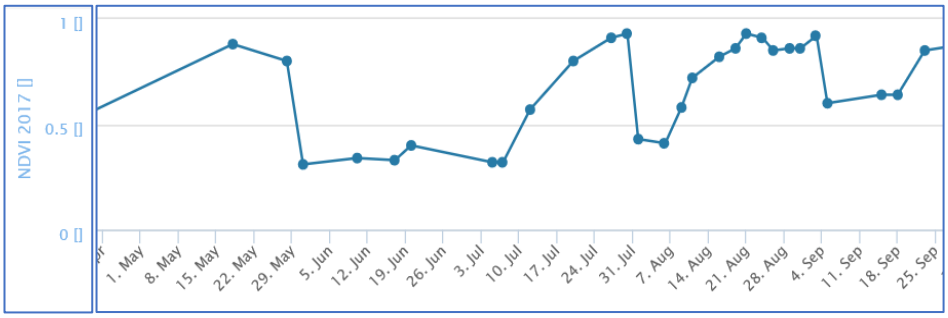

Figura 37. Andamento dell'indice NDVI per l'erba medica.

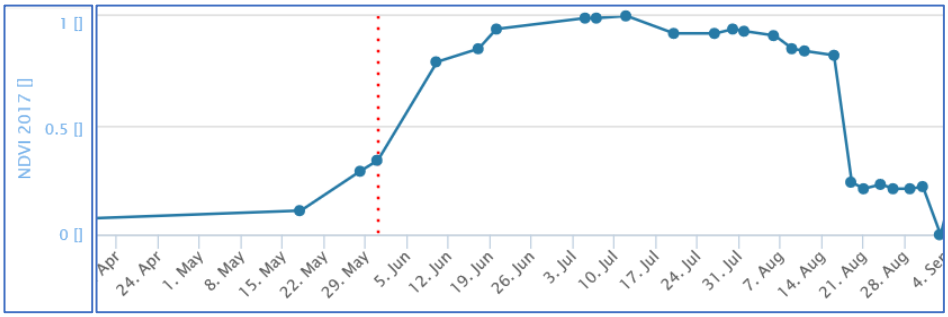

Figura 38. Andamento dell'indice NDVI per il mais.

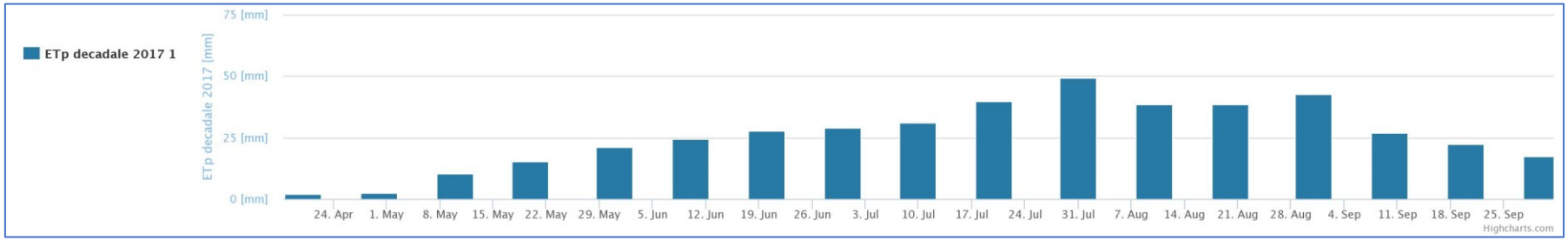

Figura 39. Andamento dell'ETc per l'erba medica.

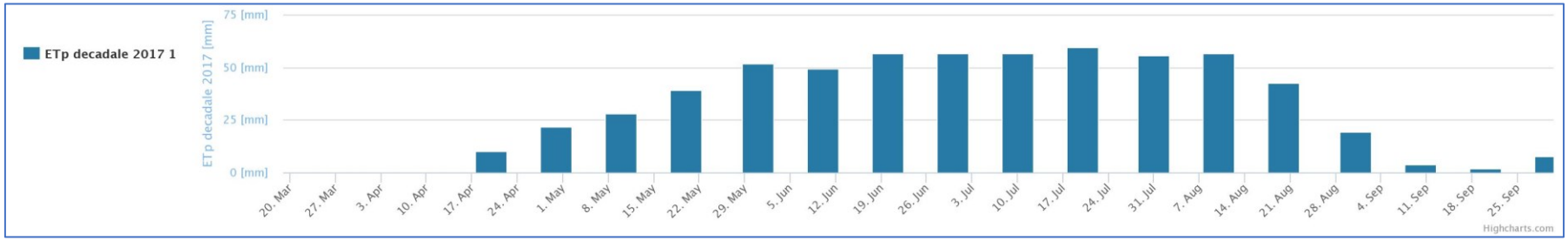

Figura 40. Andamento dell'ETc per il mais

CAPITOLO 4

APPLICAZIONE DEL METODO ANALITICO

Nel presente capitolo viene applicata la metodologia esposta precedentemente, all'area oggetto di studio. Tale metodologia è oggi la rappresentazione più realistica del processo evapotraspirativo, a tal proposito viene utilizzata in quest'analisi, ha una forma analitica, ma al suo interno sono presenti bilanci di energia e trasferimenti di massa, quindi ha un fondamento fisico. Per la valutazione dell'evapotraspirazione standard, l'uso di questo metodo richiede la disponibilità di una mole di dati importante per il periodo di valutazione, che nel caso in esame si estende per tutta la durata della stagione irrigua stabilita dal Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano, che nell'anno 2017 è iniziata nel mese di Maggio e si è conclusa a Settembre.

4.1. DATI AGROMETEREOLOGICI

I dati per la stima dell'evapotraspirazione di riferimento, sono a cura del Centro Agrometeorologico Regionale della Campania, la cui rete è dislocata su 30 stazioni di misura su tutto il territorio regionale per ciascuna provincia. Sono stati utilizzati i dati dell'anno 2017 riepilogati con cadenza settimanale e mensile, della stazione situata ad Alife, nella provincia di Caserta (figura 41). Inoltre l'anno considerato è stato uno degli anni aventi minori precipitazioni meteoriche, dell'ultimo decennio. È ragionevole supporre che i volumi calcolati in seguito, corrispondano a valori massimi ottenibili nel suddetto Consorzio.

Figura 41. Stazione agrometeorologica di Alife.
(http://www.agricoltura.regione.campania.it/meteo/meteo_2018.html)

La stazione è ubicata ad una latitudine di 41°20'30.7788"N ed una longitudine di 14°19'6.0024"E, ad un'altitudine di 163 m.s.l.m. I dati rilevati sono: mm di pioggia (media giornaliera, media minime e media massime); temperatura (media, minima e massima); umidità dell'aria (media, minima e massima); raffiche di vento e radiazione solare. Di seguito si riportano i dati utilizzati nella procedura di calcolo, relativi a: pioggia cumulata, temperature massime e minime, umidità relativa, radiazione solare e velocità del vento, valori medi per ogni mese della stagione irrigua.

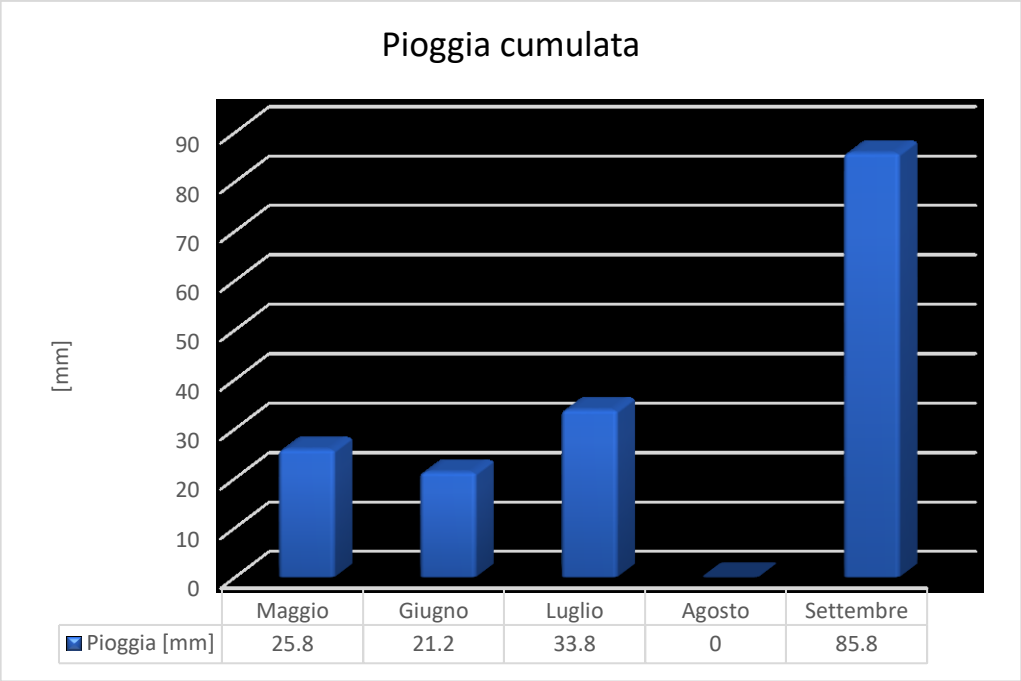

Figura 42. Pioggia cumulata nei mesi della stagione irrigua.

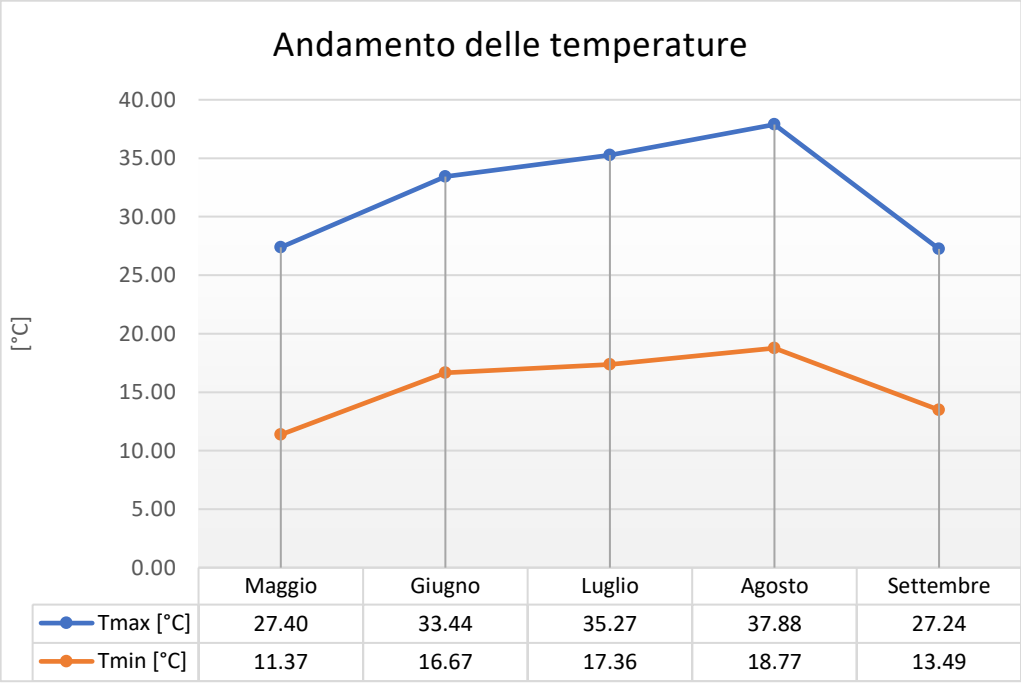

Figura 43. Andamento della temperatura massima e minima nei mesi della stagione irrigua.

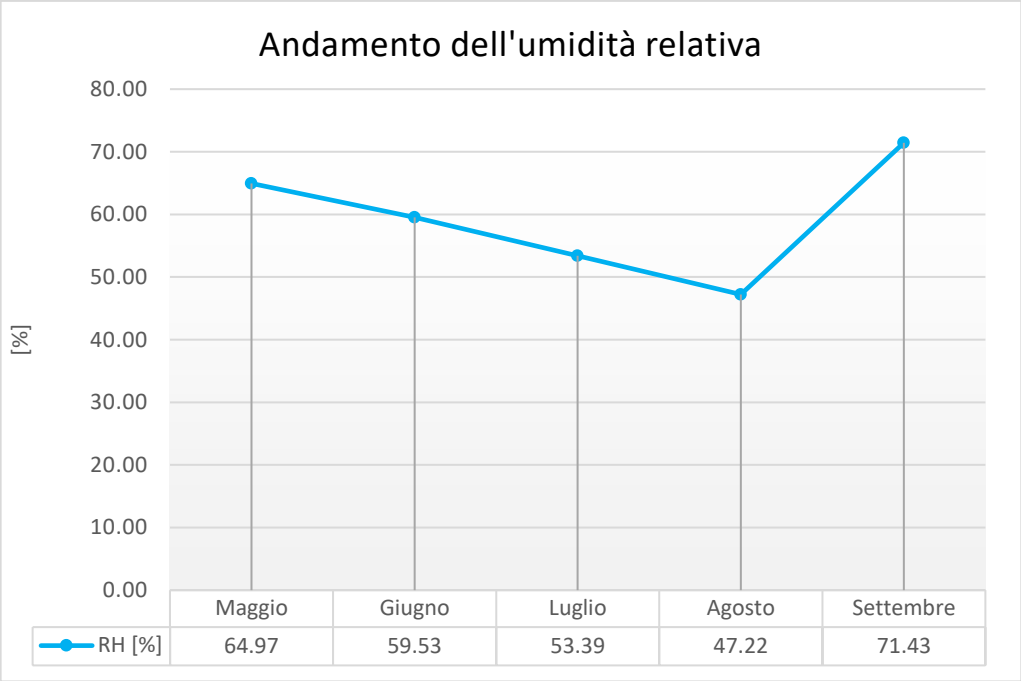

Figura 44. Andamento dell'umidità relativa nei mesi della stagione irrigua.

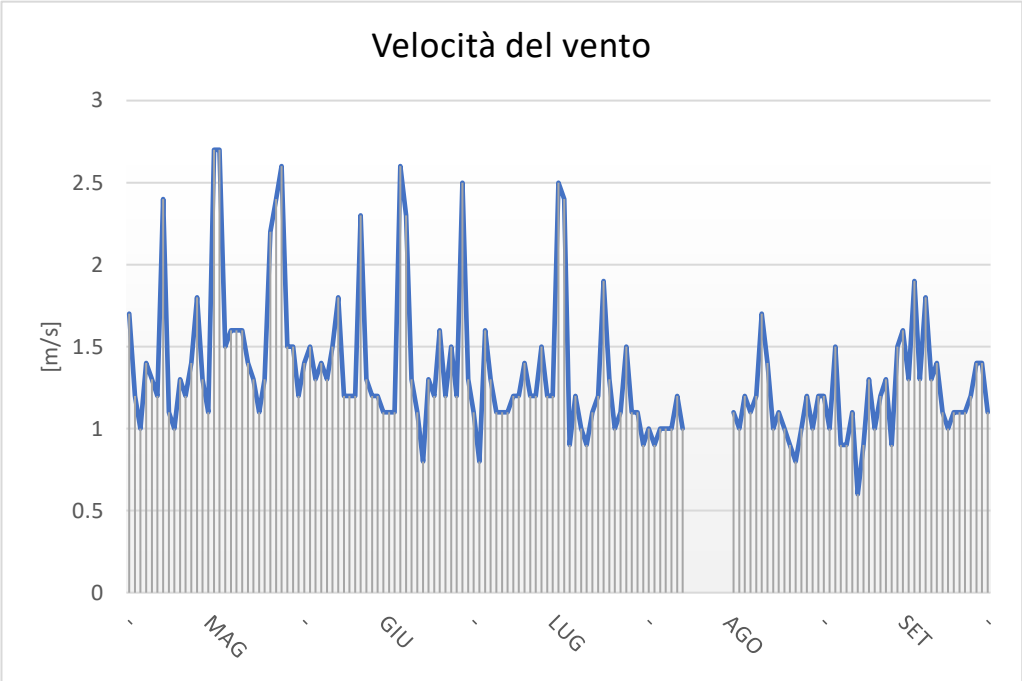

Figura 45. Andamento della velocità del vento nei mesi della stagione irrigua.

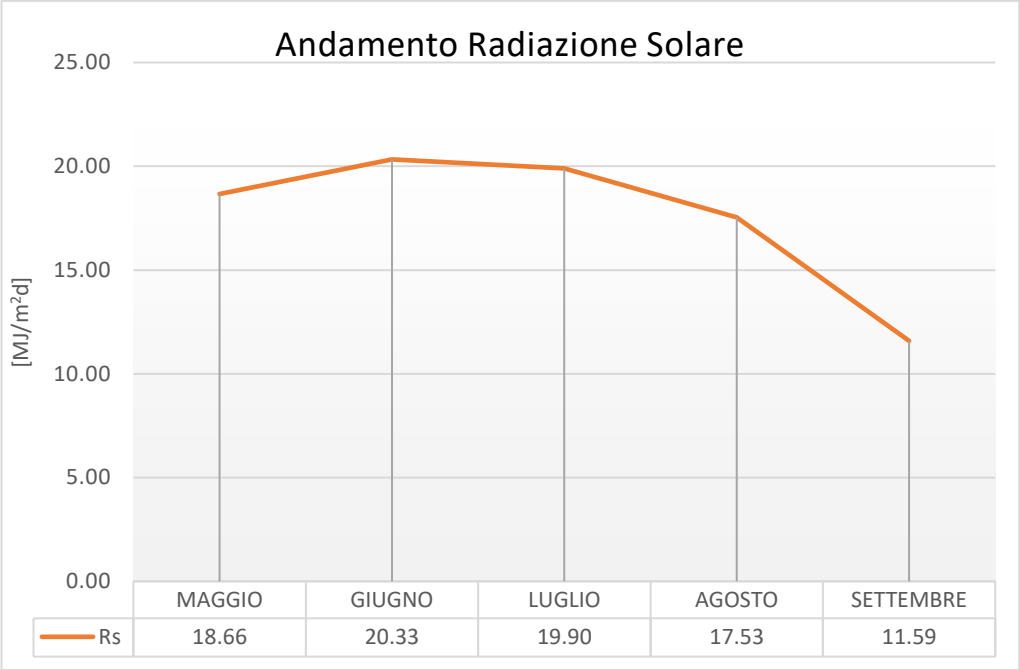

Figura 46. Andamento della radiazione solare nei mesi della stagione irrigua.

4.2. APPROCCIO ANALITICO: applicazione diretta dell'equazione di Penman-Monteith

La modellizzazione fisica del processo evapotraspirativo secondo l'approccio *two-steps* si completa nella quantificazione dell'evapotraspirazione standard ET_0 e del coefficiente colturale K_c, secondo quanto riportato in precedenza. A valle dell'acquisizione dei dati agrometeorologici, è stato possibile determinare l'evapotraspirazione standard media mensile, secondo la metodologia FAO. Poiché l'analisi effettuata riguarda la stagione irrigua ricadente nei mesi di Maggio, Giugno, Luglio, Agosto e Settembre, la stima è stata effettuata esclusivamente in questi. Come è evidente dal grafico seguente, il picco evapotraspirativo si ha nel mese di Luglio, mentre il valore minimo si rileva nel mese di Settembre, questo dimostra che non esiste una diretta dipendenza tra l'evapotraspirazione ed un solo parametro agrometeorologico, ma tutti influiscono in maniera interconnessa sul contributo di ET_0. L'importanza della formulazione di Penman-Monteith risiede

proprio nella correlazione di tutti i parametri che entrano in gioco nel bilancio energetico. I calcoli inerenti si riportano nell'appendice A.1.

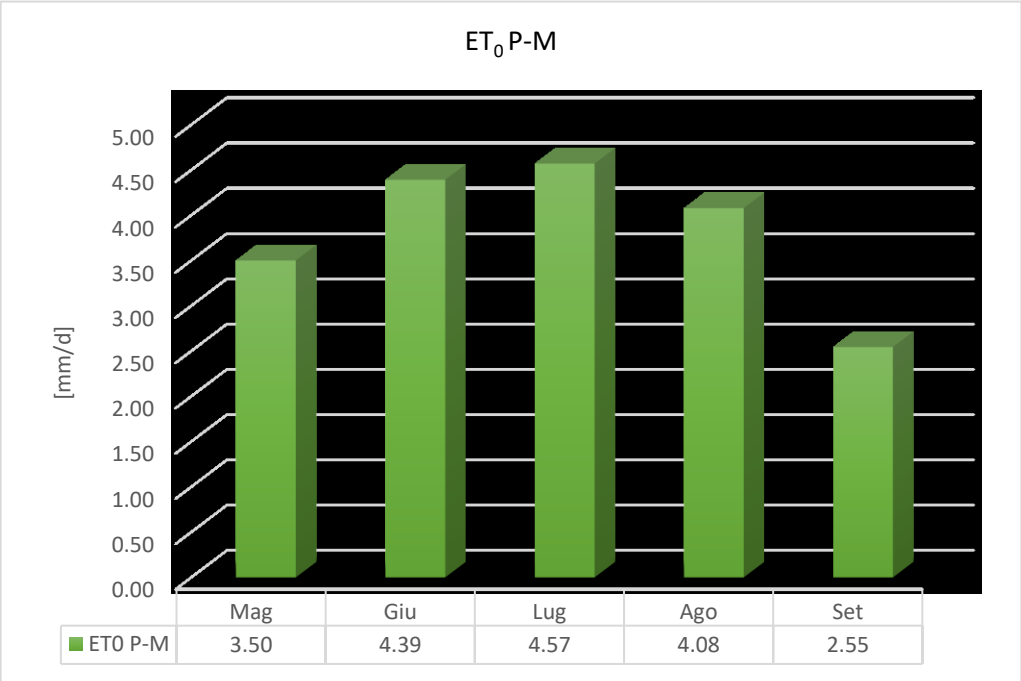

Figura 47. Andamento dell'evapotraspirazione standard.

4.3. STIMA DEL COEFFICIENTE COLTURALE K_C

Il coefficiente che permette il passaggio dalla coltura di riferimento alla coltura specifica, è definito dalla metodologia FAO secondo valori tabellati di alcune tipologie di colture (ALLEN, et al., 1998). Tali valori sono relativi a colture aventi una data durata fenologica, che non hanno subito condizioni di stress, ben coltivate, i cui coefficienti colturali sono ricavati in un clima sub-umido, con umidità relativa del 45% e velocità del vento a 2 m dal suolo di 2 m/s. Identificando la coltura, è possibile determinare la durata di ciascuna fase fenologica, anch'essa tabellata (DOORENBOS & PRUITT, 1977); successivamente si procede alla correzione dei coefficienti colturali corrispondenti a ciascuna fase, in relazione alle condizioni climatiche e alla frequenza d'adacquamento. Noti i coefficienti per le fasi colturali (iniziale, media e finale) è possibile costruire la curva di sviluppo per la coltura

analizzata, che ne descrive l'andamento, la fase di sviluppo è considerata avere un andamento lineare tra la fase iniziale e la fase media, quindi il coefficiente di sviluppo risulterà la media delle due fasi. Nel caso studio sono state analizzate le seguenti tipologie di colture:

- Mais (125 giorni)
- Erba medica (30 giorni)
- Specie arboree (240 giorni)
- Piccoli ortaggi (145 giorni)

4.3.1. Coefficiente colturale durante la fase iniziale (Kc_{ini})

La fase iniziale è caratterizzata da un potere evaporativo del suolo maggiore rispetto a quello traspirativo della coltura, poiché è facile capire che la pianta essendo nella fase iniziale è piccola. Il coefficiente colturale durante questa fase, risulta funzione dei seguenti parametri:

- *intervallo di tempo tra gli eventi di adacquamento*, in particolare all'aumentare di questi l'evaporazione aumenta, ed aumenta anche Kc_{ini},
- *potere evaporativo dell'atmosfera*, all'aumentare dell'evapotraspirazione di riferimento si ha un aumento dell'evaporazione dal suolo e una diminuzione del coefficiente colturale,
- *grandezza dell'evento di adacquamento*, per piccoli volumi di adacquamento il coefficiente risulterà essere piccolo viceversa tenderà ad aumentare.

Tutti questi parametri sono correlati tra loro, basti pensare che una pianta su un terreno asciutto sarà caratterizzata da un'evapotraspirazione piccola, poiché risulterà piccola sia l'aliquota evaporativa che quella traspirativa, invece se la pianta si trova su un terreno bagnato, sarà caratterizzata da un'aliquota traspirativa maggiore, così come il terreno avrà un'aliquota evaporativa maggiore.

La procedura di calcolo eseguita per tale coefficiente è quella proposta nel quaderno *FAO 56* (ALLEN, et al., 1998). I calcoli sono riportati nell'appendice A.2.

COLTURA	DURATA DELLA FASE [d]	MESE	Kc_{ini}
Mais	20	Maggio	**0.69**
Ortaggi	30	Maggio	**0.67**
Arboree	30	Aprile	**0.61**
Erba medica	5	Maggio	**0.79**
		Giugno	**0.50**
		Luglio	**0.46**
		Agosto	**0.23**
		Settembre	**0.99**

Tabella 5. Valori del coefficiente colturale durante la fase iniziale, per le diverse colture.

4.3.2. Coefficiente colturale durante la fase media (Kc_{mid})

La fase media di crescita della coltura, è caratterizzata da un coefficiente legato in primo luogo alle condizioni climatiche ed in secondo luogo all'altezza del raccolto; per un clima arido con velocità del vento sostenute, il coefficiente risulta elevato, se il clima risulta umido con velocità del vento basse il coefficiente sarà piccolo (ALLEN, et al., 1998), i calcoli sono riportati nell'appendice A.2.

COLTURA	DURATA DELLA FASE [d]	MESE	Kc_{mid}
Mais	40	Luglio	**1.21**
Ortaggi	45	Lug/Ago	**1.16**
Arboree	120	Lug/Ago/Set/Ott	**0.88**
Erba medica	10	Maggio	**0.89**
		Giugno	**0.95**
		Luglio	**0.92**
		Agosto	**0.92**
		Settembre	**0.86**

Tabella 6. Valori del coefficiente colturale durante la fase media, per le diverse colture.

4.3.3. Coefficiente colturale durante la fase di sviluppo ($Kc_{development}$)

In questa fase il coefficiente di sviluppo rappresenta la percentuale di copertura della coltura sul terreno, infatti al 40% di superficie coperta corrisponde un Kc circa uguale a 0.5. Di seguito si riportano i valori per ogni tipologia di coltura:

COLTURA	DURATA DELLA FASE [d]	MESE	$Kc_{development}$
Mais	35	Giugno	**0.95**
Ortaggi	40	Giugno	**0.91**
Arboree	60	Mag/Giu	**0.74**
Erba medica	5	Maggio	**0.84**
		Giugno	**0.72**
		Luglio	**0.69**
		Agosto	**0.57**
		Settembre	**0.92**

Tabella 7. Valori del coefficiente colturale durante la fase di sviluppo, per le diverse colture.

4.3.4. Coefficiente colturale durante la fase finale (Kc_{end})

Il coefficiente colturale in questa fase, risulta avere le stesse dipendenze della fase precedente. I coefficienti della letteratura sono stati corretti per condizioni differenti di umidità dal 45%, e per valori di velocità del vento differenti da 2 m/s (ALLEN, et al., 1998), i calcoli sono riportati nell'appendice A.2.

COLTURA	DURATA DELLA FASE [d]	MESE	Kc_{end}
Mais	30	Ago	**0.59**
Ortaggi	30	Ago/Set	**0.69**
Arboree	30	Nov	**0.58**
Erba medica	5	Maggio Giugno Luglio Agosto Settembre	**0.90** **0.86** **0.83** **0.86** **0.82**

Tabella 8. Valori del coefficiente colturale durante la fase finale, per le diverse colture.

In sintesi si riportano gli andamenti dei coefficienti colturali per l'intera stagione irrigua, per ogni tipologia di coltura.

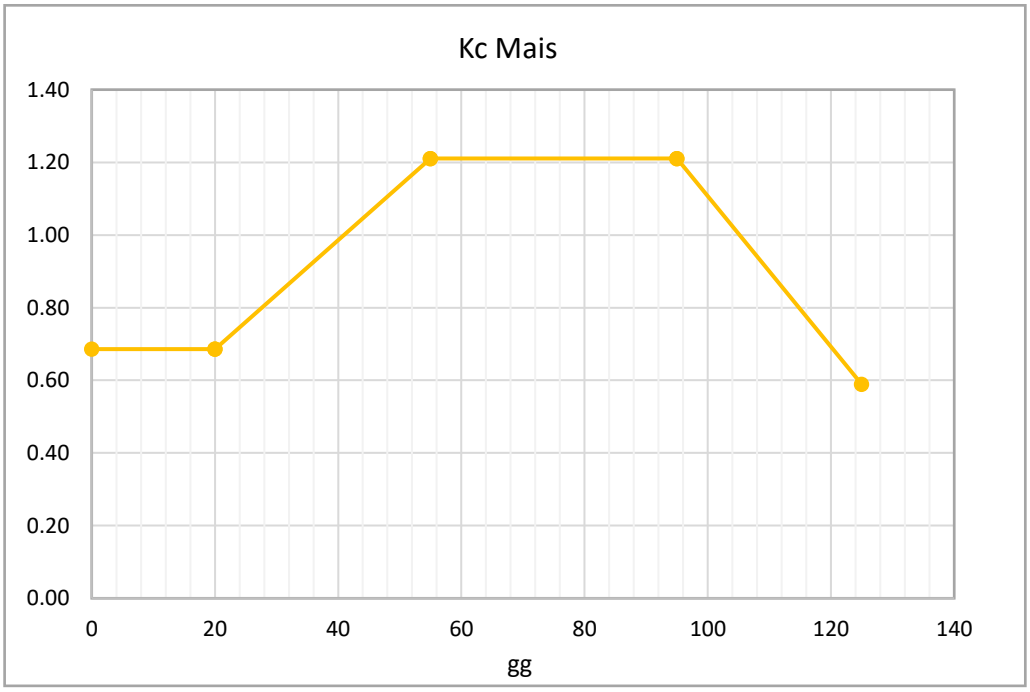

Figura 48. Andamento del coefficiente colturale per il mais nell'intera stagione irrigua.

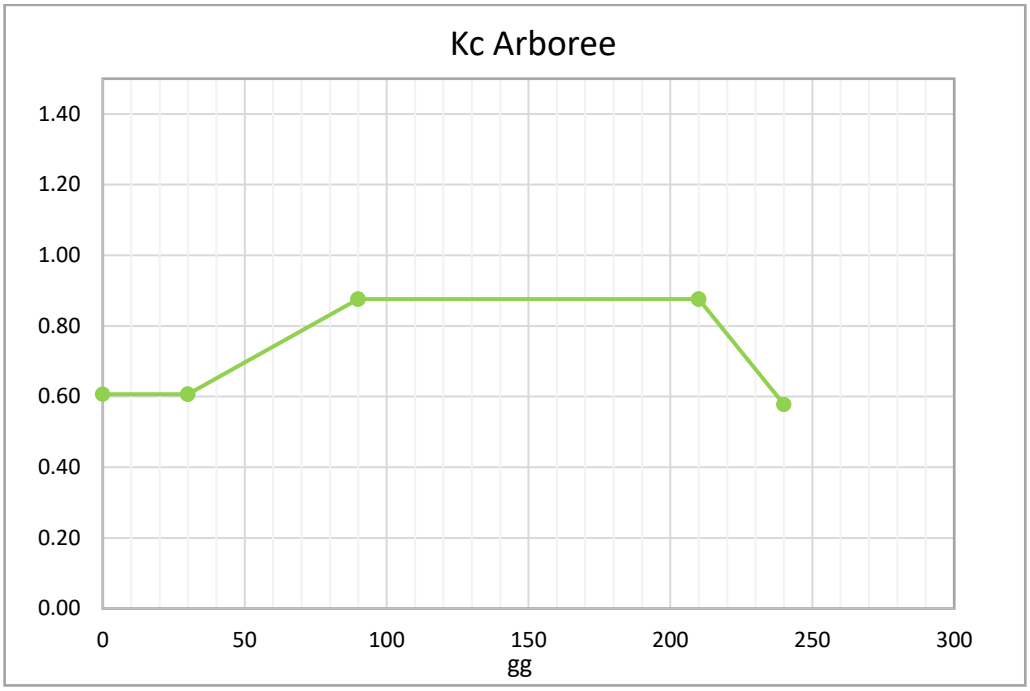

Figura 49. Andamento del coefficiente colturale per le specie arboree nell'intera stagione irrigua.

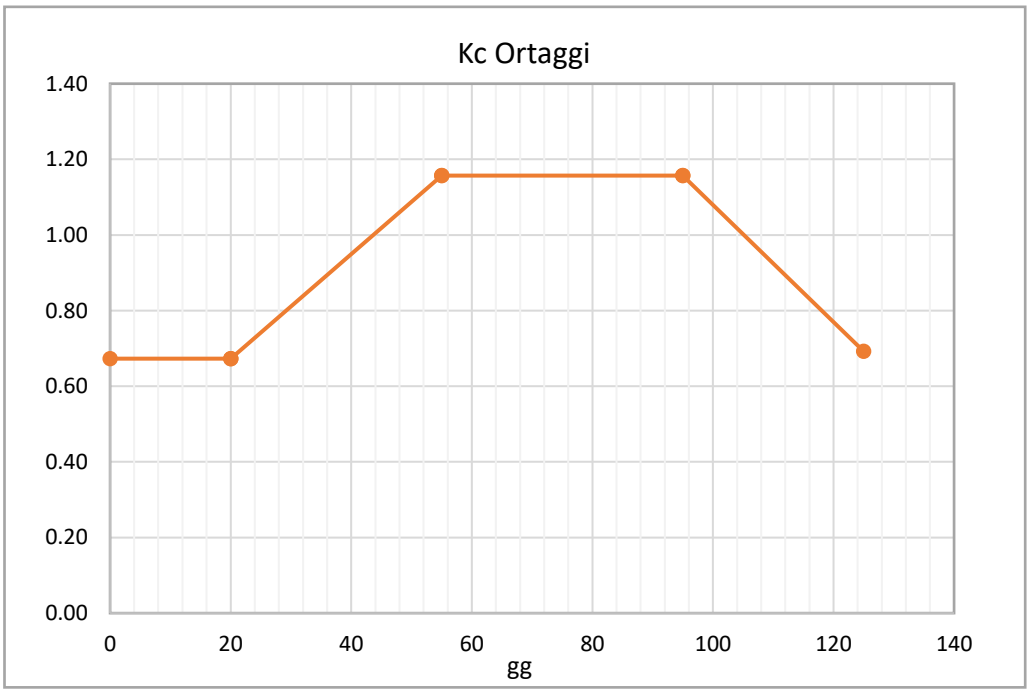

Figura 50. Andamento del coefficiente colturale per gli ortaggi nell'intera stagione irrigua.

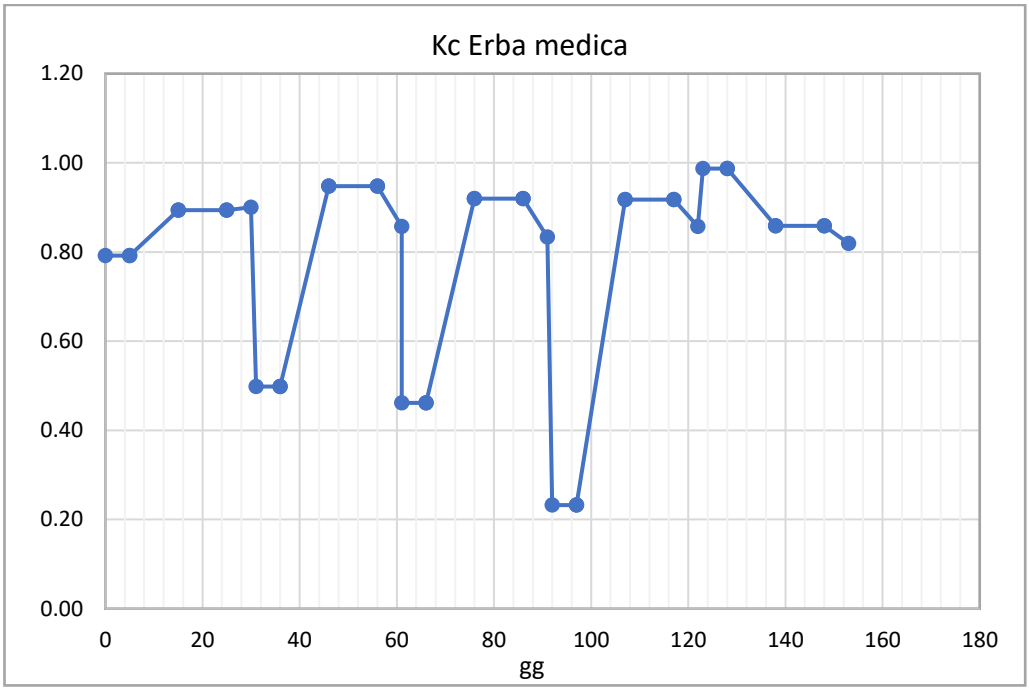

Figura 51. Andamento del coefficiente colturale per l'erba medica nell'intera stagione irrigua.

4.4. STIMA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE COLTURALE ET_C

Determinato il potere evapotraspirativo dell'atmosfera ET_0 e l'andamento del coefficiente colturale di ciascuna fase della specie in esame, è possibile determinare l'evapotraspirazione inerente la coltura, secondo la (23). In questo modo è possibile conoscere la quantità d'acqua che evapora dal suolo e traspira dalla pianta. Nell'analisi effettuata è stato stimato un valore di ET_c per ogni fase di crescita, durante la stagione irrigua per ciascuna coltura. Il mais evolve completamente da Maggio ad Agosto; l'erba medica invece, che ha una durata di 30 giorni dell'intera fase di crescita, inoltre si è ipotizzato che si effettuano 5 raccolti durante la stagione irrigua; i piccoli vegetali, come gli ortaggi, hanno una crescita corrispondente alla stagione irrigua, quindi con raccolto a Settembre; le specie arboree hanno una crescita completamente differente da queste elencate, in particolare le drupacee sono caratterizzate da una fase di dormienza che parte nell'autunno con la caduta delle foglie e termina in primavera con la nascita delle gemme, è stato quindi assunto che la fase iniziale corrisponda ad Aprile, la fase di sviluppo ai mesi di Maggio e Giugno, quella media a Luglio, Agosto, e Settembre, quella finale con

conseguente raccolto ad Ottobre, quindi le fasi che ricadono nella stagione irrigua sono quella di sviluppo e quella media.

Nella tabella che segue è possibile osservare i valori ottenuti mediante la metodologia FAO dell'evapotraspirazione colturale:

MESE	Fase di crescita	ETc Mais [mm/d]	ETc Ortaggi [mm/d]	ETc Arboree [mm/d]	ETc Erba medica [mm/d]
Mag	Initial stage	2.40	2.36	-	2.77
	Crop development stage	-	-	2.60	2.95
	Mid stage	-	-	-	3.13
	Late season stage	-	-	-	3.15
Giu	Initial stage	-	-	-	2.19
	Crop development stage	4.17	4.02	3.26	3.18
	Mid stage	-	-	-	4.16
	Late season stage	-	-	-	3.76
Lug	Initial stage	-	-	-	2.11
	Crop development stage	-	4.18	-	3.16
	Mid stage	5.53	5.29	4.00	4.20
	Late season stage	-	-	-	3.81
Ago	Initial stage	-	-	-	0.95
	Crop development stage	-	-	-	2.34
	Mid stage	-	4.72	3.57	3.74
	Late season stage	2.40	2.83	-	3.50
Set	Initial stage	-	-	-	2.51
	Crop development stage	-	-	-	2.35
	Mid stage	-	-	2.23	2.19
	Late season stage	-	1.76	-	2.09

Tabella 9. Valori dell'ETc durante l'intera stagione irrigua, per le diverse colture.

Si possono osservare gli andamenti dell'evapotraspirazione per ogni tipologia di coltura analizzata, per l'intera stagione irrigua:

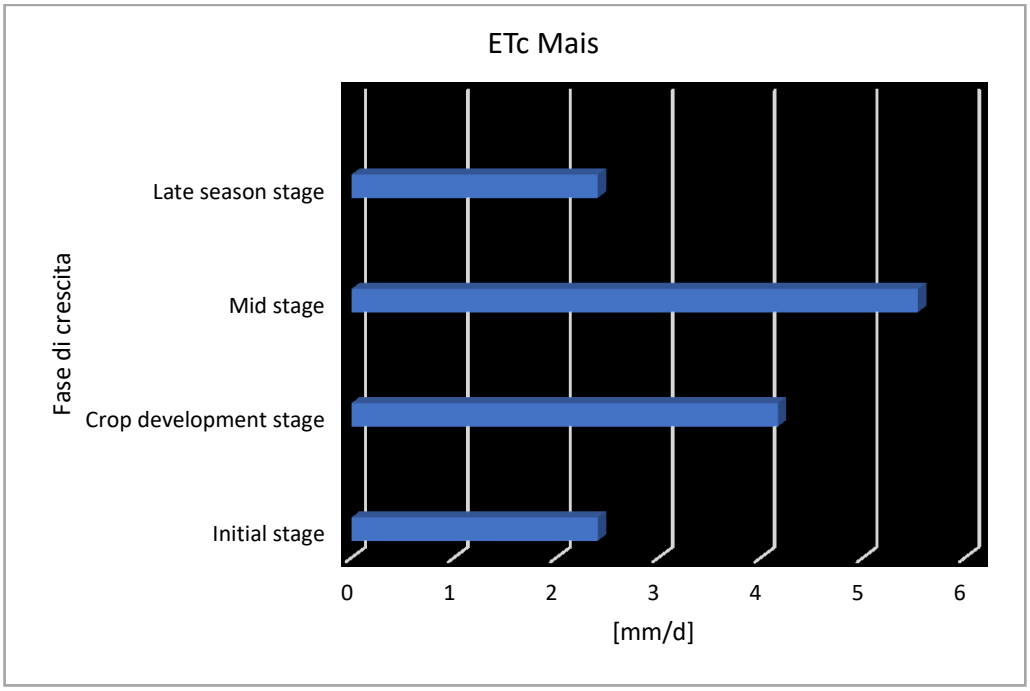

Figura 52. Andamento dell'evapotraspirazione colturale per il mais nell'intera stagione irrigua.

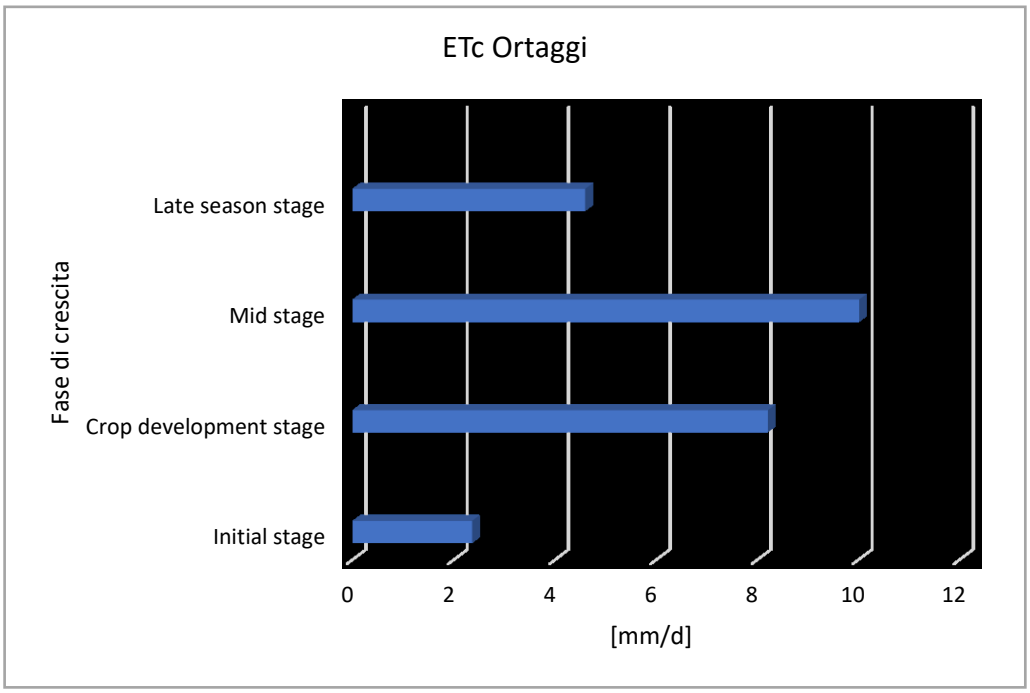

Figura 53. Andamento dell'evapotraspirazione colturale per gli ortaggi nell'intera stagione irrigua.

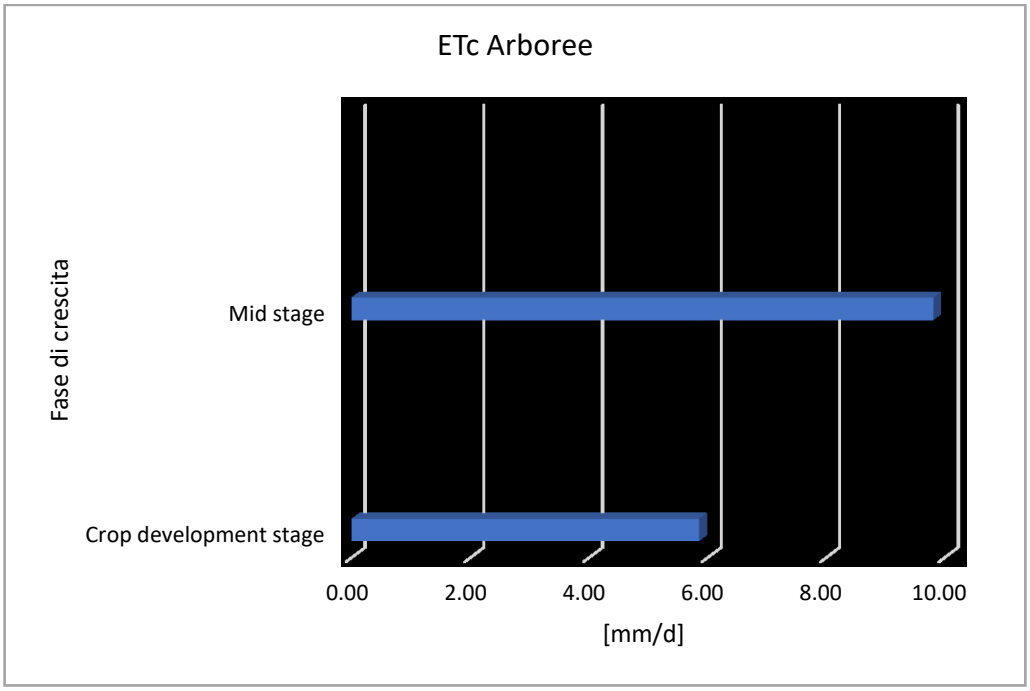

Figura 54. Andamento dell'evapotraspirazione colturale per le specie arboree nell'intera stagione irrigua.

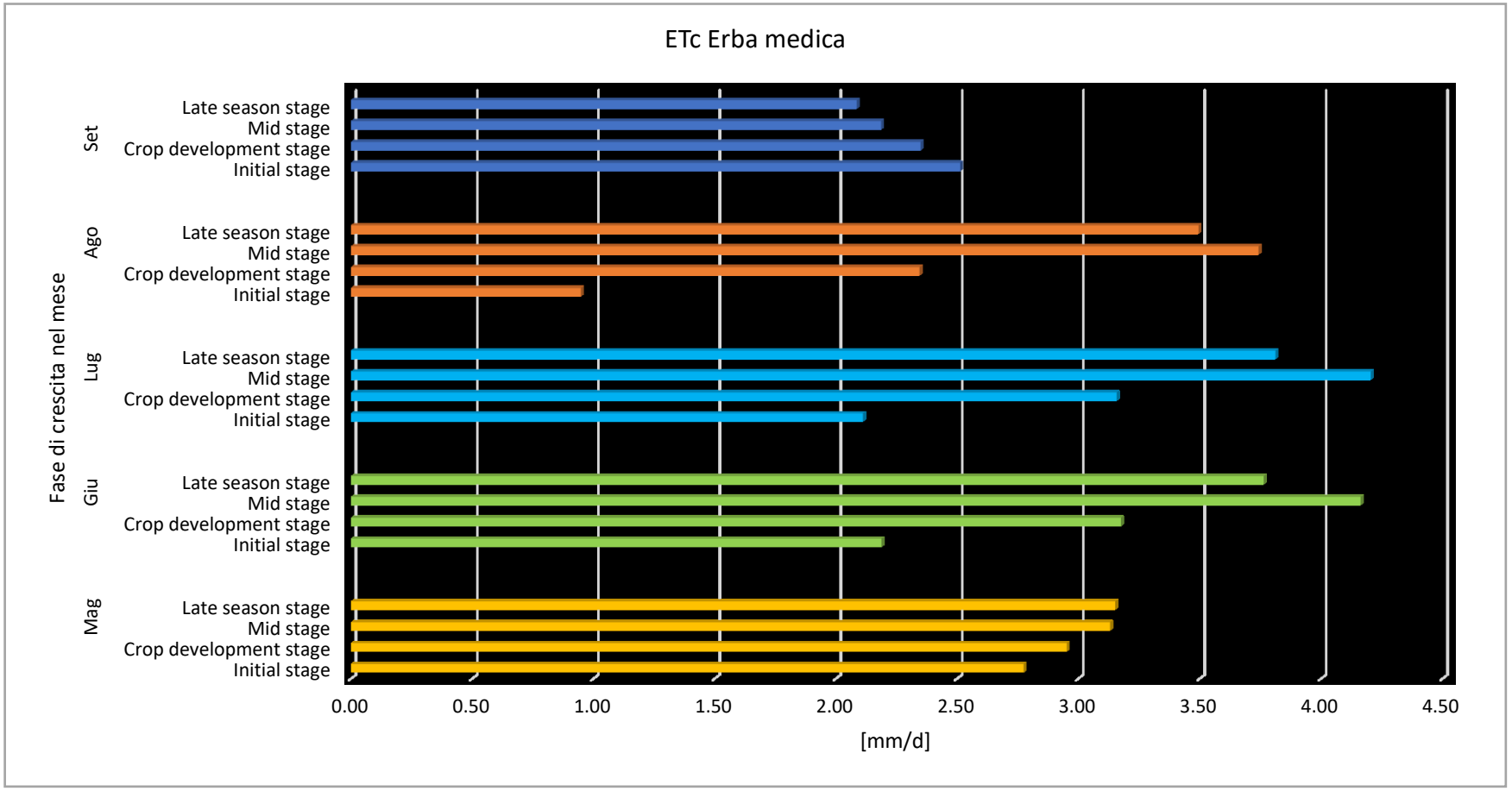

Figura 55. Andamento dell'evapotraspirazione colturale per l'erba medica nell'intera stagione irrigua.

Dall'elaborazione dei dati meteorologici e delle caratteristiche delle specie vegetali prese a riferimento, si osserva che i valori maggiori di ET_c si hanno nello stadio medio dell'intero ciclo vegetativo, questo per tutte le colture. Il valore è rappresentativo del fatto che durante questa fase, il vegetale ha un bisogno maggiore di acqua per chiudere il bilancio evapotraspirativo, poiché deve raggiungere la maturazione. Inoltre essendo ET_c direttamente proporzionale a K_c, il suo massimo valore si raggiunge anche quando è massimo il valore di K_c (durante la fase media). Vi è solo un valore che differisce da questo discorso, quello relativo ad ET_c della coltura "erba medica" nei mesi di Maggio e Settembre, nel primo il valore massimo di ET_c si ha nella fase finale, nel secondo si ha nella fase iniziale. La spiegazione risiede nel fatto che K_c dipende dalle caratteristiche meteorolgiche, infatti nel mese di Maggio si osserva un picco della velocità del vento proprio nella fase finale (figura 27), che fa innalzare l'evapotraspirazione fino a superare il valore caratteristico della fase media. Nel mese di Settembre invece si osserva il valore massimo di ET_c nella fase iniziale, la quale risulta strettamente correlata all'evento tipico di pioggia, che risulta essere pari a 11 mm, il massimo dato osservato durante la stagione irrigua. È noto che all'aumentare dell'evento di adacquamento, aumenta $K_{c\ ini}$ e quindi l'evapotraspirazione risulta essere maggiore nella fase iniziale.

Da ciò si deduce che secondo la metodologia applicata, l'evapotraspirazione dipende fortemente dalle condizioni climatiche, in particolare dalle precipitazioni, dalla velocità del vento e dall'umidità relativa.

4.5. STIMA DEI FABBISOGNI IRRIGUI

Definita la campagna irrigua, che nel 2017 è iniziata a Maggio e si è conclusa a Settembre, è possibile definire il fabbisogno irriguo o "competenza annua" (FALCIAI, 1993), il volume da assegnare all'ettaro della coltura specifica durante tutta la campagna irrigua. Nel caso in esame è stato definito il fabbisogno irriguo per le colture definite in precedenza, esso risulta dipendente dall'evapotraspirazione

colturale ET_c, dalla pioggia netta P_n e dall'efficienza dell'impianto irriguo ρ, secondo quanto riportato nel paragrafo 2.5. Nel caso studio considerato, si può ritenere ragionevole considerare un'efficienza di adduzione e di distribuzione pari al 100%, ciò è garantito dal bilancio che si può effettuare, grazie alla presenza di misuratori di portata, tra l'ingresso e l'uscita della risorsa idrica dall'impianto, invece per quanto concerne l'efficienza di applicazione al campo, gli utenti applicano una metodologia di irrigazione ad *aspersione* per il mais, l'erba medica e gli ortaggi, con un'efficienza di circa il 70-80%, mentre si migliora in termini di efficienza nel caso delle specie arboree, le quali vengono irrigate con impianti a *goccia* che risultano avere un'efficienza del 90% (ROGERS, et al., 1997).

Dalle valutazioni effettuate è possibile ricavare il fabbisogno irriguo:

COLTURA	TIPO DI IRRIGAZIONE	FABBISOGNO IRRIGUO [m^3/ha]
Mais	Aspersione	**5,080.49**
Ortaggi	Aspersione	**5,492.16**
Arboree	Goccia	**4,060.78**
Erba medica	Aspersione	**4,470.11**

Tabella 10. Valori del fabbisogno irriguo, per le diverse colture.

I calcoli si riportano nell'appendice A.3.

4.6. VOLUME IRRIGUO STIMATO

Noto il fabbisogno necessario ad ogni coltura, è possibile stimare il volume irriguo che l'ente deve rilasciare agli utenti, in modo da avere la quantità d'acqua ideale per ciascuna area irrigata, al fine di effettuarne un oculato uso per evitare inutili

sprechi e conseguire il risultato migliore in termini produttivi. Un utilizzo non razionale dell'acqua può ridurre, anche in modo rilevante, l'utilità della pratica irrigua e in alcuni casi determinare gravi danni in campo. Infatti, un'eccessiva irrigazione rispetto alle esigenze colturali può provocare lesioni, marciumi o addirittura compromettere la conservabilità di prodotti pronti per la raccolta, può determinare la comparsa di ristagni idrici, peggiorare la struttura del suolo e favorire il dilavamento degli elementi nutritivi presenti nel terreno.

La valutazione è stata effettuata sulla base degli ettari delle particelle fornite dal Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano, secondo le domande irrigue presentate dalle utenze. Dal caso studio effettuato sulle piane di Presenzano, Vairano e Riardo si evince un andamento dei volumi irrigui di seguito illustrato:

COLTURA	PIANA	AREA [ha]	VOLUME IRRIGUO [m^3]
Erba Medica	PRESENZANO	7.82	34,933.90
	VAIRANO	57.87	258,663.73
	RIARDO	977.21	4,368,215.13
	TOTALE	**1,042.89**	**4,661,812.76**
Mais	PRESENZANO	91.57	465,202.54
	VAIRANO	361.71	1,837,680.70
	RIARDO	77.95	396,002.15
	TOTALE	**531.23**	**2,698,885.39**
Ortaggi	PRESENZANO	33.21	182,367.16
	VAIRANO	211.17	1,159,774.96
	RIARDO	206.59	1,134,637.89
	TOTALE	**450.97**	**2,476,780.01**
Arboree	PRESENZANO	109.30	443,830.76
	VAIRANO	354.38	1,439,063.69
	RIARDO	379.60	1,541,455.56
	TOTALE	**843.27**	**3,424,350.00**
TOTALE		**2,868.35**	**13,261,828.16**

Tabella 11. Valori dei volumi irrigui stimati, per le diverse colture.

CAPITOLO 5

ANALISI, RISULTATI E DISCUSSIONI

5.1. VOLUME IRRIGUO EROGATO

Dai dati forniti gentilmente dal Consorzio, le cui piane analizzate sono attrezzate con contatori volumetrici tipologia "Woltmann" posti in corrispondenza di ogni idrante, è possibile conoscere i volumi irrigui prelevati da ogni utente. Le letture delle schede elettroniche utilizzate dagli utenti per prelevare i volumi necessari agli adacquamenti, hanno fornito i volumi complessivi prelevati per ciascuna azienda oggetto di studio.

PIANA	AREA [ha]	VOLUMI EROGATI [m^3]	VOLUMI STIMATI *FAO* [m^3]
PRESENZANO	242.00	697,720.00	1,126,334.36
VAIRANO	985.00	3,648,479.00	4,695,183.07
RIARDO	1,641.00	7,321,321.00	7,440,310.73
TOTALI	**2,868.00**	**11,667,520.00**	**13,261,828.16**

Tabella 12. Valori dei volumi irrigui erogati e stimati con il metodo FAO per le diverse piane.

I volumi ottenuti dalla metodologia *FAO* sono maggiori del 12% rispetto ai volumi effettivamente erogati dal Consorzio. Questo risultato può essere attribuito a diversi aspetti: nella classificazione delle tipologie di colture presenti sul territorio, non è stata effettuata una distinzione tra la specie arborea della drupacea e la specie arborea del nocciolo, di quest'ultima è stato ipotizzato lo stesso comportamento fenologico della specie drupacea; questo aspetto porta a considerare un quantitativo volumetrico maggiore, poiché il nocciolo in realtà non ha lo stesso sviluppo fenologico dei classici alberi da frutto che necessitano di maggiori adacquamenti in termini di volumi. Infatti nella piana di Presenzano, i volumi differiscono

maggiormente poiché la percentuale di arboree presenti è maggiore rispetto alle altre colture (tabella 13).

PIANA	COLTURA	AREA COLTURA [%]
PRESENZANO	Erba medica	3.23%
	Mais	37.86%
	Ortaggi	13.73%
	Arboree	**45.19%**
VAIRANO	Erba medica	5.87%
	Mais	36.72%
	Ortaggi	21.44%
	Arboree	35.97%
RIARDO	Erba medica	59.54%
	Mais	4.75%
	Ortaggi	12.59%
	Arboree	23.13%

Tabella 13. Aree delle colture in percentuale per ciascuna piana.

Ulteriore aspetto è rappresentato dall'impiego degli utenti che fanno della risorsa idrica applicata all'erba medica, questa necessita di volumi d'acqua maggiori rispetto i volumi che normalmente gli vengono forniti. Nello specifico l'erba medica viene mantenuta sotto le condizioni di *stress idrico*, nell'ottica di poter prolungare il suo ciclo vegetativo per un numero maggiore di anni. A dimostrazione di ciò, è stato effettuato il focus aziendale sulle colture di mais ed erba medica, citato nel capitolo precedente e del quale si riportano i volumi erogati a confronto con i volumi stimati dalla suddetta metodologia *FAO*:

Coltura	Volumi stimati [m^3]	Volumi erogati [m^3]
Erba medica	2,070.11	1,805.00
Mais	27,637.89	32,841.40

Tabella 14. Valori dei volumi irrigui erogati e stimati secondo il metodo FAO per le aziende oggetto di studio.

È da notare che i volumi erogati per lo sviluppo del mais, sono maggiori di quelli che effettivamente servirebbero allo stesso per un adeguato sviluppo, mentre a conferma di quanto detto sopra i volumi erogati per la crescita dell'erba medica sono inferiori a quelli che servirebbero alla coltura per il suo sviluppo.

5.2. VOLUME IRRIGUO DAL SERVIZIO IRRISAT

L'applicazione del telerilevamento è finalizzata al consiglio irriguo, tramite l'osservazione da remoto del satellite, il servizio IRRISAT è in grado di suggerire all'agricoltore il volume irriguo da fornire alla propria coltura, e il momento in cui risulta più conveniente adacquare. Nell'ambito di questo studio, il servizio è stato utilizzato per stimare sulla base del consiglio irriguo, i volumi che sarebbero necessari alle colture presenti nelle piane analizzate per crescere in condizioni ottimali. I dati forniti dall'ARIESPACE s.r.l. sono stati utili ai fini del confronto con i volumi effettivamente erogati alle utenze e quelli stimati con il metodo *FAO*:

AREE	Consorzio		IRRISAT	
Piana	Erbacee [ha]	Arboree [ha]	Erbacee [ha]	Arboree [ha]
Vairano Patenora	630.75	354.38	431.16	582.85
Presenzano	132.59	109.30	224.95	541.85
Riardo - Pietravairano - Pietramelara	1,261.74	379.60	1,282.57	978.67
TOTALE	**2,025.08**	**843.27**	**1,938.68**	**2,103.37**

Tabella 15. Aree effettive del Consorzio e aree rilevate da satellite.

4,695,183.07

VOLUMI	Consorzio	IRRISAT			*FAO* P-M
Piana	**Volume Tot. [m^3]**	**Volume Erbacee [m^3]**	**Volume Arboree [m^3]**	**Volume Tot. [m^3]**	**Volume Tot. [m^3]**
Vairano Patenora	3,648,479.00	1,986,259.59	2,956,014.55	4,942,274.15	4,695183.07
Presenzano	697,720.00	948,529.33	2,577,292.08	3,525,821.41	1,126,334.36
Riardo - Pietravairano - Pietramelara	7,321,321.00	6,389,211.71	4,790,596.08	11,179,807.79	7,440,310.73
TOTALE	**11,667,520.00**	9,324,000.63	10,323,902.72	**19,647,903.34**	**13,261,828.16**

Tabella 16. Volumi effettivi del Consorzio, volumi stimati con la metodologia FAO e volumi rilevati da IRRISAT.

Come si evince dai dati sopra riportati, IRRISAT sovrastima i volumi, in particolare per le specie arboree. È facile notare che ciò è ascrivibile ad una sovrastima delle aree coperte dalle specie arboree, rilevate dal satellite (tabella 15), in quanto quest'ultimo non effettua una parcellizzazione delle piane, osservando solo le aree irrigate, ma rileva anche le specie arboree esenti da irrigazione, per cui la stima dei volumi comprende anche queste ultime. Invece confrontando le aree delle erbacee stimate da satellite con quelle effettive, i risultati sono confrontabili. Per cui è da escludere che la discordanza dei volumi complessivi sia dovuta alle specie erbacee. Questo è dimostrabile, concentrando le analisi effettuate dal sistema IRRISAT, sulle singole particelle prese a riferimento descritte in precedenza.

	CONSORZIO		IRRISAT		*FAO* P-M	
COLTURA	**VOLUME [m³]**	**FABB. [m³/ha]**	**VOLUME [m³]**	**FABB. [m³/ha]**	**VOLUME [m³]**	**FABB. [m³/ha]**
Erba medica [0.46 ha]	1,805.00	3,897.65	2,177.44	4,701.89	2,070.11	4,470.11
Mais [5.44 ha]	32,841.40	6,037.02	34,084.62	6,265.56	27,637.89	5,080.49

Tabella 17. Volumi effettivi e fabbisogni del Consorzio, volumi rilevati e fabbisogni da IRRISAT, volumi rilevati e fabbisogni con il metodo FAO per le singole particelle.

Entrando nel dettaglio della particella di erba medica, vediamo che la differenza è di circa il 18% in più rispetto ai dati misurati in campo, poiché anche in questo caso vale lo stesso discorso fatto nel paragrafo precedente, relativamente al mantenimento della coltura sotto le condizioni di stress idrico da parte degli utenti. Mentre per il mais la differenza tra i dati misurati dall'autorità del Consorzio e quelli stimati da remoto è di circa il 4%. Concludendo si può affermare che la difficoltà nello stimare i volumi irrigui da remoto, risiede nella valutazione delle aree coperte dalle specie arboree.

A tal proposito, per svincolare il problema delle stime dei volumi dalle aree, si riportano i valori dei fabbisogni irrigui stimati con la metodologia *FAO* e con quelli rilevati dal sistema IRRISAT:

FAO P-M		IRRISAT	
FABBISOGNO ERBACEE [m³/ha]	**FABBISOGNO ARBOREE [m³/ha]**	**FABBISOGNO ERBACEE [m³/ha]**	**FABBISOGNO ARBOREE [m³/ha]**
4,857.83	4,060.78	4,653.61	4,907.85

Tabella 18. Fabbisogno irriguo per coltura stimato con il metodo FAO e rilevato da IRRISAT.

Come si evince da tale confronto il fabbisogno che il sistema IRRISAT rileva per la specie delle erbacee e per le colture arboree, differisce di poco con quello stimato dalla metodologia *FAO*. Pertanto le problematiche che si rilevano dalla stima dei volumi, effettuata con il sistema di telerilevamento, sono ascrivibili al rilevamento delle aree a specie arboree effettivamente irrigate.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo studio di tesi è stata sviluppata l'applicazione della metodologia *FAO* (riportata nel quaderno FAO 56) mediante l'approccio *two-steps*, combinando i dati meteorologici, con valori dei coefficienti colturali desunti dalla letteratura, che tengono conto della tipologia di vegetazione, della durata del ciclo vegetativo e della posizione geografica in cui è praticata la coltura. La progettazione della maggior parte delle infrastrutture idrauliche presenti sul territorio è stata effettuata sulla base di questa metodologia, ma la variabilità spaziale e temporale dei coefficienti che stanno alla base dell'evapotraspirazione, rappresenta un'importante incertezza nella progettazione. Dall'inizio degli anni '90 è andata sviluppandosi sempre di più la ricerca nella conoscenza di metodi che eliminassero la dipendenza dal tempo e dallo spazio dei parametri che intervengono nella stima del fabbisogno irriguo. Sono nate così tecniche per le analisi di dati da *Osservazioni della Terra*, il telerilevamento satellitare. In questo modo, grazie ai sensori satellitari dotati di risoluzioni sempre maggiori, e alla grande quantità di immagini satellitari che si hanno a disposizione, è possibile controllare le variazioni del fabbisogno irriguo nello spazio e nel tempo. Alla base del telerilevamento, per stimare il fabbisogno, vi è la formulazione di Penman-Monteith, applicata secondo l'approccio *one-step*. Tale approccio risultava e risulta ancora difficile da applicare poiché i parametri che entrano in gioco devono essere misurati sul campo (ad esempio è complicato stimare l'indice di area fogliare durante tutto lo sviluppo della coltura). Oggi grazie all'evoluzione delle nuove tecnologie, la stima degli indici di vegetazione è effettuata da satellite. Il tema centrale dello studio è rappresentato proprio dalla stima del fabbisogno irriguo e del volume irriguo, mediante le due metodologie appena descritte. Le analisi sono state calate nel caso studio del Consorzio di Bonifica del Sannio Alifano, che avvalendosi del sistema IRRISAT, che applica il telerilevamento all'irrigazione, fornisce "consiglio irriguo" agli agricoltori, la dimensione spaziale è superata poiché il satellite riesce a rilevare con risoluzione sino a 10 x 10m lo stato della coltura; la dimensione temporale è stata invece ridotta

grazie al rilevamento satellitare ogni 5-7 giorni, fornendo un consiglio irriguo tempestivo per il raccolto. Tale consiglio applicato al Consorzio del Sannio Alifano, è stato utilizzato ai fini della stima dei volumi irrigui nella stagione 2017. Mediante dati concessi dal suddetto Consorzio, sono stati presi a riferimento anche i volumi che i singoli agricoltori effettivamente prelevano, ai fini di effettuare un confronto tra: i volumi appena descritti, i volumi stimati con IRRISAT ed i volumi stimati con la validata metodologia *FAO*. Questo confronto è stato effettuato su tre differenti piane gestite dal consorzio: piana di Presenzano, piana di Vairano Patenora, e piana di Riardo-Pietravairano-Pietramelara. I risultati hanno dimostrato che i volumi stimati da IRRISAT a scala di piana, risultano sovrastimare del 60% i volumi prelevati dagli utenti. Questa discordanza risiede nella sovrastima delle aree coltivate, in particolare il satellite rileva in maniera soddisfacente le aree coltivate con erbacee, mentre le aree coltivate con arboree subiscono un incremento relativo alle colture che non vengono irrigate. Essendo giunti a tale conclusione, il problema è stato circoscritto alla singola particella, effettuando un focus aziendale riguardante le colture di mais ed erba medica. I risultati in tal caso sono migliori, poiché la differenza tra i volumi stimati da satellite e quelli erogati si riduce, il mais è sottostimato del 4%, mentre il volume relativo all'erba medica viene sovrastimato del 18% da IRRISAT, ma anche questa sovrastima ha una spiegazione che risiede nella metodologia di pratica irrigua di quest'ultima, la quale alle nostre latitudini, viene lasciata in condizioni di stress idrico, per farla perdurare maggiormente nel suo ciclo pluriennale. Questa ipotesi è avvalorata dal fatto che la stima secondo la metodologia *FAO* ci ha condotto agli stessi risultati.

In conclusione si può affermare che la metodologia *FAO* tanto acclarata, è molto affidabile per la stima dei fabbisogni, e quindi dei volumi, ma questa risulta importante ai fini della progettazione delle opere idrauliche connesse all'irrigazione. Questa metodologia permette di stabilire i fabbisogni idrici per ogni coltura, ma non consente di capire quando sia il momento di fornire acqua alle colture, cosa superata grazie all'introduzione dei sistemi di telerilevamento. Ciò è reso possibile dal fatto che l'osservazione da remoto, consente di monitorare le colture durante tutto il loro sviluppo, e consigliare quando è il momento di intervenire con la risorsa idrica.

Recenti studi analoghi, effettuati nel territorio del Consorzio di Bonifica Destra Sele, hanno di mostrato che i volumi stimati con il sistema IRRISAT e quelli erogati dal suddetto Consorzio sono confrontabili, in particolare il prelievo che gli utenti fanno è maggiore del 15% rispetto a quelli rilevati (VUOLO, et al., 2014). In questo studio il sistema IRRISAT oltre ad essere stato confrontato con i dati effettivi di campo, è stato validato anche mediante l'applicazione della metodologia *FAO*. Essendo i fabbisogni irrigui stimati da IRRISAT, paragonabili alla metodologia applicata nello studio effettuato, si consiglia di accompagnare il telerilevamento per il Consorzio del Sannio Alifano, con un accurato censimento delle aree e delle colture irrigate, in special modo per le colture arboree, al fine di adattare e calibrare il sistema IRRISAT al riconoscimento delle suddette aree.

APPENDICE

A.1

Calcoli per la stima dell'evapotraspirazione di riferimento.

MAGGIO

PARAMETRI INIZIALI	Altitudine [m]	u_2 [m/s]	Δ [Kpa /°C]	P [Kpa]	γ [Kpa/ °C]
	163.00	1.60	0.14	99.39	0.07

DEFICIT PRESSIONE DI VAPORE	$e°(T_{max})$ [Kpa]	$e°(T_{min})$ [Kpa]	e_s [Kpa]	e_a [Kpa]	T_{dew} [°C]	e_s- e_a [Kpa]
	2.95	1.35	2.15	1.40	11.92	0.75

RADIAZIONE	Latitudine [°Nord]	G_{SC} [MJ/m² min]	J	d_r [rad]	δ [rad]	φ [rad]	ω_s [rad]	R_a [MJ/m²d]	R_s [MJ/m²d]	R_{so} [MJ/m²d]	R_{ns} [MJ/m²d]	σ $T^4_{max,K}$ [MJ/m2d]	σ $T^4_{min,K}$ [MJ/m2d]	R_{nl} [MJ/m²d]	R_n [MJ/m²d]	G [MJ/m²d]
	41.20	0.08	137	0.98	0.34	0.72	1.88	39.86	18.70	30.02	14.40	40.01	32.14	3.09	11.31	0.75

ET_0 [mm/d]	**3.50**

GIUGNO

PARAMETRI INIZIALI	Altitudine [m]	u_2 [m/s]	Δ [Kpa/ °C]	P [Kpa]	γ [Kpa/ °C]
	163.00	1.40	0.19	99.39	0.07

DEFICIT PRESSIONE DI VAPORE	$e°(T_{max})$ [Kpa]	$e°(T_{min})$ [Kpa]	e_s [Kpa]	e_a [Kpa]	T_{dew} [°C]	e_s- e_a [Kpa]
	4.01	1.90	2.95	1.77	15.59	1.18

RADIAZIONE	Latitudine [°Nord]	G_{SC} [MJ/m² min]	J	d_r [rad]	δ [rad]	φ [rad]	ω_s [rad]	R_a [MJ/m²d]	R_s [MJ/m²d]	R_{so} [MJ/m²d]	R_{ns} [MJ/m²d]	σ $T^4_{max,K}$ [MJ/m2d]	σ $T^4_{min,K}$ [MJ/m2d]	R_{nl} [MJ/m²d]	R_n [MJ/m²d]	G [MJ/m²d]
	41.20	0.08	167	0.97	0.41	0.72	1.96	41.88	20.30	31.54	15.63	43.30	34.61	3.10	12.53	0.49

ET_0 [mm/d]	**4.39**

LUGLIO

PARAMETRI INIZIALI	Altitudine [m]	u_2 [m/s]	Δ [Kpa/ °C]	P [Kpa]	γ [Kpa/ °C]
	163.00	1.30	0.20	99.39	0.07

DEFICIT PRESSIONE DI VAPORE	$e°(T_{max})$ [Kpa]	$e°(T_{min})$ [Kpa]	e_s [Kpa]	e_a [Kpa]	T_{dew} [°C]	e_s- e_a [Kpa]
	4.40	1.99	3.20	1.69	14.89	1.50

RADIAZIONE	Latitudine [°Nord]	G_{SC} [MJ/m² min]	J	d_r [rad]	δ [rad]	φ [rad]	ω_s [rad]	R_a [MJ/m²d]	R_s [MJ/m²d]	R_{so} [MJ/m²d]	R_{ns} [MJ/m²d]	σ $T^4_{max,K}$ [MJ/m2d]	σ $T^4_{min,K}$ [MJ/m2d]	R_{nl} [MJ/m²d]	R_n [MJ/m²d]	G [MJ/m²d]
	41.20	0.08	198	0.97	0.37	0.72	1.92	40.59	19.90	30.57	15.32	44.38	34.94	3.31	12.01	0.23

ET_0 [mm/d]	**4.57**

AGOSTO

PARAMETRI INIZIALI	Altitudine [m]	u_2 [m/s]	Δ [Kpa/ °C]	P [Kpa]	γ [Kpa/ °C]
	163.00	1.20	0.22	99.39	0.07

DEFICIT PRESSIONE DI VAPORE	$e°(T_{max})$ [Kpa]	$e°(T_{min})$ [Kpa]	e_s [Kpa]	e_a [Kpa]	T_{dew} [°C]	e_s- e_a [Kpa]
	5.00	2.17	3.59	1.69	14.82	1.90

RADIAZIONE	Latitudine [°Nord]	G_{SC} [MJ/m² min]	J	d_r [rad]	δ [rad]	φ [rad]	ω_s [rad]	R_a [MJ/m²d]	R_s [MJ/m²d]	R_{so} [MJ/m²d]	R_{ns} [MJ/m²d]	σ $T^4_{max,K}$ [MJ/m2d]	σ $T^4_{min,K}$ [MJ/m2d]	R_{nl} [MJ/m²d]	R_n [MJ/m²d]	G [MJ/m²d]
	41.20	0.08	259	0.99	0.03	0.72	1.60	29.20	17.50	21.99	13.48	45.90	35.62	4.67	8.80	-0.42

ET_0 [mm/d]	**4.08**

SETTEMBRE

PARAMETRI INIZIALI	Altitudine [m]	u_2 [m/s]	Δ [Kpa/ °C]	P [Kpa]	γ [Kpa/ °C]
	163.00	1.20	0.15	99.39	0.07

DEFICIT PRESSIONE DI VAPORE	$e°(T_{max})$ [Kpa]	$e°(T_{min})$ [Kpa]	e_s [Kpa]	e_a [Kpa]	T_{dew} [°C]	e_s- e_a [Kpa]
	2.92	1.55	2.23	1.58	13.86	0.65

RADIAZIONE	Latitudine [°Nord]	G_{SC} [MJ/m² min]	J	d_r [rad]	δ [rad]	φ [rad]	ω_s [rad]	R_a [MJ/m²d]	R_s [MJ/m²d]	R_{so} [MJ/m²d]	R_{ns} [MJ/m²d]	σ $T^4_{max,K}$ [MJ/m2d]	σ $T^4_{min,K}$ [MJ/m2d]	R_{nl} [MJ/m²d]	R_n [MJ/m²d]	G [MJ/m²d]
	41.20	0.08	259	0.99	0.03	0.72	1.60	29.20	11.60	21.99	8.93	39.90	33.10	2.16	6.77	-0.79

ET_0 [mm/d]	**2.55**

A.2

Calcoli per la stima del coefficiente colturale nella fase iniziale.

Fase iniziale	20	gg		
Mese	**Pioggia$_{mensile}$ [mm/month]**	**Giorni di pioggia**	**Typical rainfall (I) [mm]**	**Time interval**
Apr	11.4	5	2	6
Mag	25.8	9	3	3
Giu	21.2	5	4	6
Lug	33.8	4	8	8
Ago	0	0	0	0
Set	85.8	8	11	4
Ott	6.6	3	2	10

Mais.

Mais 125gg			All soil texture light infiltration <10mm				Coarse soil texture large infiltration>40mm				Medium and fine soil texture large infiltration>40mm					
n_w	**t_W**	**E_{SO}**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**Kc_{ini} coarse texture**	**Kc_{ini} fine and medium texture**
5.81	3.17	4.03	10.00	3.21	0.80	0.75	13.10	6.00	1.49	0.93	24.33	9.00	2.23	1.11	**0.71**	**0.67**

Ortaggi.

Ortaggi 145gg			All soil texture light infiltration <10mm				Coarse soil texture large infiltration>40mm				Medium and fine soil texture large infiltration>40mm					
n_w	**t_W**	**E_{SO}**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**Kc_{ini} coarse texture**	**Kc_{ini} fine and medium texture**
8.71	3.26	4.03	10.00	3.21	0.80	0.74	13.10	6.00	1.49	0.92	24.33	9.00	2.23	1.11	**0.69**	**0.65**

Arboree.

Arboree, 240gg			All soil texture light infiltration <10mm				Coarse soil texture large infiltration>40mm				Medium and fine soil texture large infiltration>40mm					
n_w	**t_W**	**E_{SO}**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**Kc_{ini} coarse texture**	**Kc_{ini} fine and medium texture**
5.00	5.45	2.88	10.00	3.79	1.32	0.67	11.08	6.00	2.08	0.76	20.58	9.00	3.12	1.03	**0.64**	**0.57**

Erba medica mese di maggio.

Erba medica 30gg			All soil texture light infiltration <10mm				Coarse soil texture large infiltration>40mm				Medium and fine soil texture large infiltration>40mm					
n_w	**t_W**	**E_{SO}**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**Kc_{ini} coarse texture**	**Kc_{ini} fine and medium texture**
1.45	2.56	4.03	10.00	3.21	0.80	0.85	13.10	6.00	1.49	1.03	24.33	9.00	2.23	1.14	**0.81**	**0.78**

Erba medica mese di giugno.

Erba medica 30gg			All soil texture light infiltration <10mm				Coarse soil texture large infiltration>40mm				Medium and fine soil texture large infiltration>40mm					
n_w	**t_W**	**E_{SO}**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**Kc_{ini} coarse texture**	**Kc_{ini} fine and medium texture**
0.83	3.75	5.05	10.00	2.86	0.57	0.56	14.67	6.00	1.19	0.77	27.24	9.00	1.78	1.01	**0.52**	**0.48**

Erba medica mese di luglio.

Erba medica 30gg			All soil texture light infiltration <10mm				Coarse soil texture large infiltration>40mm				Medium and fine soil texture large infiltration>40mm					
n_w	**t_W**	**E_{SO}**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**Kc_{ini} coarse texture**	**Kc_{ini} fine and medium texture**
0.65	4.37	5.26	10.00	2.81	0.53	0.48	14.97	6.00	1.14	0.68	27.80	9.00	1.71	0.94	**0.47**	**0.46**

Erba medica mese di agosto.

Erba medica 30gg			All soil texture light infiltration <10mm				Coarse soil texture large infiltration>40mm				Medium and fine soil texture large infiltration>40mm					
n_w	**t_W**	**E_{SO}**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**Kc_{ini} coarse texture**	**Kc_{ini} fine and medium texture**
0.16	7.56	4.69	10.00	2.97	0.63	0.32	14.14	6.00	1.28	0.45	26.26	9.00	1.92	0.73	**0.28**	**0.19**

Erba medica mese di settembre.

Erba medica 30gg			All soil texture light infiltration <10mm				Coarse soil texture large infiltration>40mm				Medium and fine soil texture large infiltration>40mm					
n_w	**t_W**	**E_{SO}**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**TEW_{cor}[mm]**	**REW_{cor}[mm]**	**t_1**	**Kc**	**Kc_{ini} coarse texture**	**Kc_{ini} fine and medium texture**
1.33	2.73	2.93	10.00	3.76	1.28	0.98	11.17	6.00	2.05	1.10	20.74	9.00	3.07	1.14	**0.99**	**0.99**

Calcoli per la stima del coefficiente colturale nella fase media.

Mais.

Fase media	40	gg	Mais 125gg			
Mese	**Umidità RH_{mean} [%]**	**Umidità RH_{min} [%]**	**u_2 [m/s]**	**h media [m]**	**$Kc_{mid\ tab}$**	**Kc_{mid}**
Lug	53	35	1.3	2	1.2	**1.21**

Ortaggi.

Fase media	45	gg	Pomodori 145gg			
Mese	**Umidità RH_{mean} [%]**	**Umidità RH_{min} [%]**	**u_2 [m/s]**	**h media [m]**	**$Kc_{mid\ tab}$**	**Kc_{mid}**
Lug	53	35	1.3	0.5	1.15	**1.16**
Ago	47					

Arboree.

Fase media	120	gg	Arboree, 240gg			
Mese	**Umidità RH_{mean} [%]**	**Umidità RH_{min} [%]**	**u_2 [m/s]**	**h media [m]**	**$Kc_{mid\ tab}$**	**Kc_{mid}**
Lug	53	43	1.2	3	0.9	**0.88**
Ago	47					
Set	71					
Ott	68					

Erba medica.

Fase media	10	gg	**Erba medica 30gg**			
Mese	**Umidità RHmean [%]**	**Umidità RHmin [%]**	**u2 [m/s]**	**h media [m]**	**Kcmid tab**	**Kcmid**
Mag	65	63	1.4	0.5	0.95	**0.89**
Giu	60	40	1.4	0.5	0.95	**0.95**
Lug	53	50	1.2	0.5	0.95	**0.92**
Ago	47	50	1.1	0.5	0.95	**0.92**
Set	71	75	1.1	0.5	0.95	**0.86**

Calcoli per la stima del coefficiente colturale nella fase finale.

Mais.

Fase finale	30	gg	Mais 125gg			
Mese	**Umidità RH_{mean} [%]**	**Umidità RH_{min} [%]**	**u_2 [m/s]**	**h media [m]**	**$Kc_{end\ tab}$**	**Kc_{end}**
Ago	47	40	1.2	2.5	0.6	**0.59**

Ortaggi.

Fase finale	30	gg	Pomodori 145gg			
Mese	**Umidità RH_{mean} [%]**	**Umidità RH_{min} [%]**	**u_2 [m/s]**	**h media [m]**	**$Kc_{end\ tab}$**	**Kc_{end}**
Ago	47	40	1.2	0.6	0.7	**0.69**
Set	71					

Arboree.

Fase finale	30	gg	Arboree, 240gg			
Mese	**Umidità RH_{mean} [%]**	**Umidità RH_{min} [%]**	**u_2 [m/s]**	**h media [m]**	**$Kc_{end\ tab}$**	**Kc_{end}**
Nov	82	55	1.2	3	0.65	**0.58**

Erba medica.

Fase media	10	gg	Erba medica 30gg			
Mese	**Umidità RHmean [%]**	**Umidità RHmin [%]**	**u2 [m/s]**	**h media [m]**	**Kcmid tab**	**Kcmid**
Mag	65	43	1.8	1	0.9	**0.90**
Giu	60	55	1.5	1	0.9	**0.86**
Lug	53	60	1.2	1	0.9	**0.83**
Ago	47	50	1	1	0.9	**0.86**
Set	71	75	1.1	0.5	0.95	**0.86**

A.3

Calcoli per la stima del fabbisogno irriguo.

Mais.

FASE DI CRESCITA	MESE	ETc P-M [mm/d]	ETc P-M [mm/month]	P [mm/month]	f_c	P_n [mm/month]	P_n [mm/d]
Intila stage	Mag	**2.40**	**74.49**	25.80	1.00	18.17	0.59
Crop development stage	Giu	**4.17**	**124.97**	21.20		16.78	0.56
Mid stage	Lug	**5.53**	**171.57**	33.80		29.48	0.95
Late season stage	Ago	**2.40**	**74.44**	0.00		0.00	0.00

FASE DI CRESCITA	MESE	Δt	A [ha]	e_{ap}	e_d	e_a	FABBISOGNO Mais [m³/ha]
Intila stage	Mag	31.00	1.00	0.75	1.00	1.00	750.93
Crop development stage	Giu	30.00					1,442.54
Mid stage	Lug	31.00					1,894.53
Late season stage	Ago	31.00					992.49
TOTALE							**5,080.49**

Ortaggi.

FASE DI CRESCITA	MESE	ETc P-M [mm/d]	ETc P-M [mm/month]	P [mm/month]	f_c	P_n [mm/month]	P_n [mm/d]	Δt	A [ha]	e_{ap}	e_d	e_a	FABBISOGNO Ortaggi [m³/ha]
Initial stage	Mag	**2.36**	**73.05**	25.80		18.11	0.58	31.00					732.47
Crop development stage	Giu	**4.02**	**120.56**	21.20		16.61	0.55	30.00					1,386.01
	10-lug-18	**4.18**	**129.66**	33.80		26.77	0.86	10.00					442.58
Mid stage	11-lug-18	**5.29**	**163.97**	33.80	1.00	28.97	0.93	20.00	1.00	0.75	1.00	1.00	1,161.31
	25-ago-18	**4.72**	**146.31**	0.00		0.00	0.00	25.00					1,573.24
Late season stage	26-ago-18	**2.83**	**87.58**	0.00		0.00	0.00	5.00					188.35
	25-set-18	**1.76**	**52.89**	85.80		52.15	1.74	25.00					8.21
TOTALE													**5,492.16**

Arboree.

FASE DI CRESCITA	MESE	ETc P-M [mm/d]	ETc P-M [mm/month]	P [mm/month]	f_c	P_n [mm/month]	P_n [mm/d]
Crop development stage	Mag	2.60	80.46	25.80	1.00	18.43	0.59
	Giu	3.26	97.66	21.20		15.76	0.53
Mid stage	Lug	4.00	124.14	33.80		26.43	0.85
	Ago	3.57	110.78	0.00		0.00	0.00
	Set	2.23	66.90	85.80		53.86	1.80

FASE DI CRESCITA	MESE	Δt	A [ha]	e_{ap}	e_d	e_a	FABBISOGNO Arboree [m³/ha]
Crop development stage	Mag	31.00	1.00	0.90	1.00	1.00	689.29
	Giu	30.00					910.08
Mid stage	Lug	31.00					1,085.74
	Ago	31.00					1,230.84
	Set	30.00					144.84
TOTALE							**4,060.78**

Erba medica.

FASE DI CRESCITA	MESE	ETc P-M [mm/d]	ETc P-M [mm/month]	P [mm/month]	f_c	P_n [mm/month]	P_n [mm/d]	Δt	A [ha]	e_{ap}	e_d	e_a	FABBISOGNO Erba medica [m³/ha]
Initial stage	Mag	**2.77**	**86.00**	25.80	1.00	18.66	0.60	5.00	1.00	0.75	1.00	1.00	144.81
Crop development stage		**2.95**	**91.52**			18.90	0.61	10.00					312.35
Mid stage		**3.13**	**97.04**			19.14	0.62	10.00					335.05
Late season stage		**3.15**	**97.70**			19.17	0.62	5.00					168.88
Initial stage	Giu	**2.19**	**65.64**	21.20	1.00	14.64	0.49	5.00					113.34
Crop development stage		**3.18**	**95.25**			15.67	0.52	10.00					353.71
Mid stage		**4.16**	**124.87**			16.78	0.56	10.00					480.42
Late season stage		**3.76**	**112.90**			16.32	0.54	5.00					214.63
Initial stage	Lug	**2.11**	**65.45**	33.80	1.00	23.09	0.74	5.00					91.10
Crop development stage		**3.16**	**97.89**			24.88	0.80	10.00					314.03
Mid stage		**4.20**	**130.33**			26.81	0.86	10.00					445.25
Late season stage		**3.81**	**118.17**			26.07	0.84	5.00					198.07
Initial stage	Ago	**0.95**	**29.38**	0.00	1.00	0.00	0.00	5.00					63.18
Crop development stage		**2.34**	**72.69**			0.00	0.00	10.00					312.63
Mid stage		**3.74**	**116.00**			0.00	0.00	10.00					498.91
Late season stage		**3.50**	**108.35**			0.00	0.00	5.00					233.02
Initial stage	Set	**2.51**	**75.38**	85.80	1.00	54.92	1.83	5.00					45.45
Crop development stage		**2.35**	**70.48**			54.31	1.81	10.00					71.89
Mid stage		**2.19**	**65.59**			53.70	1.79	10.00					52.84
Late season stage		**2.09**	**62.58**			53.33	1.78	5.00					20.56
TOTALE													**4,470.11**

BIBLIOGRAFIA

AKDIM, N. et al., 2014. Monitoring of Irrigation Schemes by Remote Sensing: Phenology versus Retrieval of Biophisical Variables. In: s.l.:s.n.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. & SMITH, M., 1998. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). *FAO Irrigation and Drainage Paper 56.*

BOLOGNESI, S. F. et al., 2017. Controllo delle aree irrigate nei Consorzi di Bonifica mediante analisi multi-temporale di dati Sentinel-2. *Asita.*

BOSCHETTI, M. et al., 2005. TELERILEVAMENTO. *Diffusione e sperimentazione della cartografia, del telerilevamento e dei sistemi informativi geografici, come tecnologie didattiche applicate allo studio del territorio e dell'ambiente,* Volume 3.

BRADEN, H., 1985. Ein Energiehaushalts-und Verdunstungsmodell for Wasswr und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzer Einzugsgebiete. *Mittelungen Deutsche Bodenkundliche Geselschaft, 42, 294-299, 1985..*

BURMAN, R., NIXON, P., WRIGHT, J. & W.O., P., 1980b. Water requirements.

BURMAN, R., WRIGHT, J., NIXON, P. & HILL, R., 1980a. Irrigation management-water requirements and water balance. *Irrigation, Challenges of the 80's, Proc. of the Second National Irrigation Symposium.*

CLEVERS, J., 1989. Application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment,* pp. 25-37.

DEHGHANISANIJ, H., YAMAMOTO, T. & RASIAH, V., 2004. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. *Agric Water Manage,* Issue 64, pp. 91-106.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage,* Issue 24.

DOORENBUS, J. & PRUITT, W., 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrigation and Drainge Paper,* Issue 24.

D'URSO, G., 2015. Nuove tecnologie per la stima dei fabbisogni irrigui a scala di bacino e di comprensorio. In: M. MASTRORILLI, a cura di *L' acqua in agricoltura. Gestione sostenibile della pratica irrigua.* s.l.:Edagricole-New Business Media.

D'URSO, G. & MENENTI, M., 1995. Mapping crop coefficients in irrigated areas from Landsat TM images. European Symposium on Satellite Remote Sensing II, Europto, Paris.

FALCIAI, M., 1993. *TECNICA DELL'IRRIGAZIONE.* s.l.:s.n.

FREVERT, D. K., HILL, R. & BRAATEN, B., 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficient. *Journal of irrigation and drainage, ASCE,* pp. 109:265-270.

JACKSON, R. D. & HUETE, A. R., 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine,* Volume 11, pp. 185-200.

JENSEN, M., 1968. Water consumption by agricultural plants.

KISI, O., 2013. Comparison of different empirical methods for estimating daily reference evapotranspiration in Mediterranean climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.*

MARTIN DE SANTA OLALLA, F., CALERA, A. & DOMINGUEZ, A., 2003. “Monitoring irrigation water use by combining Irrigation Advisory service, and remotely sensed data with a geographic information system”. *Agricultural Water Management,* Issue 61, pp. 111-124.

NINO, P., VANINO, S. & VUOLO, F., 2015. L'INNOVAZIONE TECNOLOGICA PER UN USO SOSTENIBILE DELLA RISORSA IDRICA IN AGRICOLTURA. *AGRIREGIONIEUROPA.*

ROGERS, D. H. et al., 1997. EFFICIENCIES AND WATER LOSSES OF IRRIGATION SYSTEMS. *IRRIGATION MANAGEMENT SERIES* .

TODOROVIC, M., 2005. *Crop Water Requirements.* s.l.:s.n.

VUOLO, F. et al., 2014. Satellite-based ittigation advisory services:A common tool for different experiences from Europe to Australia. *Agricultural Water Management.*