



*Università degli Studi di Napoli Federico II*  
*Dipartimento di Ingegneria Agraria e Agronomia del Territorio*



*Dottorato in*  
***VALORIZZAZIONE E GESTIONE DELLE RISORSE AGROFORESTALI***  
*XXIII CICLO*

***UN SISTEMA PER LA SIMULAZIONE E LA GESTIONE IRRIGUA***  
***NEL COMPENSORIO DEL DESTRA SELE***

**Ing. Edmondo M. Fasano**

Relatore e Coordinatore del Dottorato  
**Prof. Dott. Ing. Guido D'Urso**

Co-Relatore  
**Dott. Mario Palladino**

*Gennaio 2012*



*Alla mia famiglia*



## **CONTENUTI**

<b>PREFAZIONE</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO I</b>	<b>3</b>
<b><u>INTRODUZIONE</u></b>	
1.1 Risorse idriche in ambiente agrario	3
1.2 Politiche e problematiche legate alla corretta gestione dei sistemi irrigui	4
1.2.1 Accorgimenti e correttivi su vasta scala: l'apporto delle misure agroambientali	6
1.2.2 Interventi strutturali alla scala locale: evoluzione e rinnovamento degli impianti collettivi	10
1.3 Conoscenze e strumenti per la gestione integrata dei sistemi irrigui	12
1.3.1 Modelli di bilancio idrologico e metodologie per la stima indiretta dei parametri	12
1.3.2 Indirizzo informatizzato nella gestione: telerilevamento e sistemi decisionali di supporto	14
1.4 Valutazione dell'efficienza degli interventi irrigui	17
1.5 La proposta di ricerca	19
1.6 Organizzazione del lavoro	20
<b>CAPITOLO II</b>	<b>21</b>
<b><u>SISTEMI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI</u></b>	
2.1 Significato dei sistemi decisionali di supporto nella gestione delle risorse idriche	21
2.1.1 La gestione dell'informazione: preprocessing e data mining	22
2.1.2 Tipologie di DSS: fasi e componenti di processo	24
2.2 DSS in irrigazione: pregi e vantaggi per un approccio di lungo periodo	26
2.3 Algoritmi di ottimizzazione multicriteriale	28
2.3.1 L'orientamento stocastico della teoria delle code	29
2.3.2 L'approccio deterministico	30
2.4 La scala spaziale di applicazione	30
2.5 Breve rassegna sulle tipologie esistenti	32
2.5.1 Struttura di un sistema decisionale di supporto alla scala comprensoriale	32
2.5.2 Introduzione al SIMODIS: <i>SIMulation of On-Demand Irrigation Systems</i>	33
2.5.3 Il Progetto AQUATER: un approccio su media scala	37
2.5.4 Altre forme di supporto decisionale: un raffronto su vasta scala	40
2.6 Riepilogo	46
<b>CAPITOLO III</b>	<b>49</b>
<b><u>STRUMENTI E PROCEDURE DI ELABORAZIONE ED ANALISI NEL DSS SIMOSIS</u></b>	
3.1 Aspetto, finalità e prerogative del supporto decisionale	49
3.1.1 Struttura operativa: cronologia, fasi e componenti di processo	49
3.1.2 Entità e suddivisione dell'informazione alla scala giornaliera del DSS	51
3.1.3 Parametri di impianto e verifiche di funzionamento idraulico	52

3.2	Attuazione e relativi sviluppi del modello: comprensione degli input/output di sistema	54
3.2.1	Evapotraspirazione di riferimento	55
3.2.2	Altre variabili in ingresso	55
3.2.3	Fenomeni di infiltrazione nel sottosuolo	56
3.2.4	Bilancio idrologico alla scala locale delle parcelle irrigue: il modulo SWAP	57
3.2.5	Stime di evapotraspirazione e attingimento radicale delle colture	59
3.2.6	Criteri di programmazione irrigua in SIMODIS: calcolo dei volumi di intervento	61
3.2.7	Simulazione idraulica della rete in condizioni di moto uniforme e stazionario	63

## ***CAPITOLO IV*** **67**

### ***DEFINIZIONE DELL'AREA DI STUDIO***

---

4.1	La Piana del Sele: presentazione generale dell'area di indagine	67
4.2	Il Comprensorio del Destra Sele: suddivisione e compiti del Consorzio di Bonifica	69
4.2.1	Sistemi di irrigazione presenti ed opere in gestione	70
4.2.2	Influenza del telecontrollo e politiche di risparmio energetico/idrico	71
4.3	L'impianto del Boscariello: segmentazione e subsistemi presenti	74
4.3.1	Natura e geometria della rete distributiva	76
4.3.2	Misure di prelievo effettivo e definizione dei principali parametri di impianto	77
4.3.3	Tipologia ed attribuzione dei gruppi di consegna in funzione delle pertinenze	78
4.4	Caratterizzazione del sistema suolo-pianta-atmosfera	78
4.4.1	Acquisizioni pedologiche annesse alle aree in studio ed oggetto di calibrazione	80
4.4.2	Uso del suolo e parametri colturali da telerilevamento	83
4.4.3	Input climatico del modello	88

## ***CAPITOLO V*** **89**

### ***IMPIEGO DEL SIMODIS ALLA SCALA DISTRETTUALE DEL BOSCARIELLO***

---

5.1	Considerazioni generali riguardo alle analisi svolte	89
5.2	Comparazione tra apporti reali e simulati	90
5.2.1	Criteri di irrigazione preliminarmente adottati: selezione del prototipo di riferimento	91
5.2.2	Distribuzione stagionale del fabbisogno irriguo mediamente conferito alle colture	94
5.2.3	Indicazioni utili sulla base degli sviluppi separatamente ottenuti	95
5.2.4	Verifica in condizioni di funzionamento ordinario (rete distributiva e vincoli imposti) e non	97
5.3	Incremento prestazionale di sistema: scenari alternativi di gestione irrigua	98
5.3.1	Valutazione comparativa nel merito delle soluzioni di intervento proposte	99
5.3.2	Fabbisogni medi e ripartizione dei contributi singoli nell'ambito delle colture intervenute	102
5.3.3	Indice di protettività dei suoli ed azione mitigante indotta dalla presenza delle colture	105
5.3.4	Produzione di indici ambientali: mappe di efficienza irrigua	106
5.4	Sintesi dei risultati e discussione conclusiva	107

### ***RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI*** **111**

<b><i>APPENDICE A - ELENCO DEI SIMBOLI</i></b>	<b>115</b>
<b><i>APPENDICE B - ELENCO DELLE FIGURE E DELLE TABELLE</i></b>	<b>119</b>
<b><i>APPENDICE C - MAPPE TEMATICHE BOSCARIELLO</i></b>	<b>123</b>
<b><i>APPENDICE D - MAPPE TEMATICHE DI EFFICIENZA IRRIGUA</i></b>	<b>127</b>





## ***PREFAZIONE***

Il miglioramento dell'efficienza dei sistemi irrigui rappresenta un obiettivo di primaria ed indiscussa importanza nella gestione razionale delle risorse idriche in agricoltura.

Andamento e sviluppo spazio-temporale dei processi fisici agenti all'interno di tali sistemi e la particolare configurazione e/o entità strutturale del complesso indagato possono decisamente influire sul funzionamento globale; rispettivamente, se ne richiedono l'attenta e idonea definizione, per cui cognizione, ed ampie possibilità di accertamento, rilievo, monitoraggio e controllo.

A tal fine, possono rivelarsi di notevole ausilio strumenti quali i modelli di bilancio e simulazione (idrologica e colturale) e tecniche di telerilevamento satellitare; le metodologie sono state recentemente applicate per l'adozione e l'elaborazione della procedura "SIMODIS" (*SIMulation of On-Demand Irrigation Systems*; D'Urso, 2001), appositamente ideata per simulare ed analizzare la condotta dei sistemi irrigui in pressione con esercizio alla domanda, in via deterministica.

Nel caso specifico, l'esperienza ha consentito di valutare ovvero apprezzare differenti strategie di gestione della risorsa idrica (scenari alternativi) nell'ambito comprensoriale del "Bosca-riello", in Destra Sele (Eboli, Salerno, Campania, Italia).

In definitiva, il medesimo approccio può estendersi alle diverse scale e proporsi per il supporto alle decisioni in senso lato, rivelandosi indubbiamente il più valido, oltre che il più efficace nell'affrontare e risolvere problematiche di pianificazione, allocazione e gestione delle stesse risorse anche in altre sfere o settori.



### **1.1 Risorse idriche in ambiente agrario**

Nel corso degli ultimi decenni l'espansione dell'irrigazione ha generato il forte incremento della produzione agraria, consentendo di adempire al maggior fabbisogno alimentare per effetto dell'esplosione demografica su scala planetaria; si stima che negli anni '50 la superficie mondiale complessivamente irrigata fosse pari a circa 94 milioni di ettari e che, attualmente, sebbene gli odierni sistemi operino ancora con un'efficienza media di poco superiore al 40% (il 15% si perde per inidoneità del metodo; più del 40% per adduzione/distribuzione a livello aziendale), la stessa superficie abbia raggiunto i 240 milioni di ettari, con oltre il 70% delle risorse idriche complessivamente impiegabili destinato a tale ambito.

La diffusione delle aree servite da reti di distribuzione irrigua è progredita al ritmo dell'1% annuo durante i primi anni '60, per raggiungere una crescita del 4% nella prima metà degli anni '70; la stessa tendenza è in definitiva risultata gradatamente attenuarsi (ancor più in zone aride e semiaride) a causa dei crescenti costi di impianto e della ridotta disponibilità idrica.

Occorre inoltre sottolineare come, all'oggi, parte delle regioni poste a coltura appaia particolarmente vulnerabile, oltre che alla siccità e/o all'erosione, ai continui squilibri nella gestione delle stesse risorse, spesso trattandosi di agrosistemi fragili sotto il profilo ecologico.

L'inadeguata consuetudine di ripartire o, peggio, dissipare scriteriatamente risorse preziose (in sé limitate) destinate ai diversi ambiti, può causare violenti e vistosi impatti sull'apparato naturale; con esclusiva attenzione al settore agrario, in ragione della sua stessa propensione ad agire in maniera estensiva sul territorio, specifiche azioni indotte possono arrecare una seria minaccia all'equilibrio degli ecosistemi e alla tutela dei suoli, ovvero alla salvaguardia della stessa produttività agricola.

La reale lettura dei costi sociali relativi alle ripercussioni dovute a possibili fenomeni di inquinamento, decadimento o esaurimento delle risorse ha portato al potenziamento delle politiche ambientali internazionali. Il quadro normativo scaturito negli ultimi decenni dall'approccio e dalla pratica di governo dell'*Unione Europea* pone questioni essenziali inerenti al miglioramento e alla difesa della qualità ambientale, all'uso sostenibile dei mezzi e delle ricchezze primarie e alla cura della salute umana per le generazioni presenti e future; più di ogni altra cosa, richiama ciascun paese al rispetto del basilare principio secondo il quale "chi inquina paga".

Tali agrosistemi, oltre a richiedere interventi mirati, risentono sensibilmente dei risultati e/o degli effetti dannosi di una gestione deleteria; gli investimenti al riguardo, più che alla possibile

espansione delle aree irrigate, tendono anzitutto al sostegno e/o al rinnovo degli impianti preesistenti, rendendoli efficienti e controllati, sia sotto l'aspetto della produttività aziendale che della razionale ripartizione delle risorse (Postel, 1993). Sviluppo ed eventuale successo di un binomio indispensabile, legato al parallelo raggiungimento di rese ottimali ed efficienze di impianto elevate (condizione direttamente associabile al minor quantitativo di risorse adoperate o apportate), rappresentano da sempre l'obiettivo principale della ricerca in ambito irriguo.

L'agricoltura moderna non affronta semplicemente sfide correlate alla tempestiva reperibilità di tali risorse, in termini di qualità o quantità per le stesse, ma una diversità di fattori direttamente annessi all'ambiente che le circonda, correlati alla competitività sui mercati, alla redditività dei prodotti e al costo della mano d'opera. Si impegna a garantire requisiti di sicurezza per gli alimenti in genere, come nei metodi di produzione, trasporto e confezionamento, frutto sapiente di continue innovazioni e della costante cooperazione con la comunità scientifica, chiamata inevitabilmente a fornire linee guida per il compimento di un uso intelligente e programmatico, ancorché economico, del patrimonio di ricchezze naturali e dei mezzi concretamente adoperati.

Si pensi all'impiego di nuovi macchinari per potenziare la capacità operativa e conseguire la miglior resa delle coltivazioni, degli idrofertilizzanti per il miglioramento e l'integrazione delle proprietà fisico-chimiche dei suoli e delle sostanze nutritive in essi contenute o, più in generale, all'ampliarsi del ventaglio di soluzioni tecniche al servizio della complessità/diformità delle questioni da affrontare, altresì derivanti da esigenze correlate alla stessa biodiversità dei terreni e dei raccolti.

In definitiva, si giunge a comprendere come, a parità di capitali investiti per l'ampliamento o il ripristino dei sistemi preesistenti, un'attenta ed esperta gestione irrigua costituisca la sola via percorribile per sopperire allo squilibrio tra impellenze di produzione ed esiguità delle risorse (rispetto per l'ambiente); in privazione di un sottile ed imparziale compromesso tra strategie politico-aziendali su più livelli strettamente associati, quali apporti idrici e questioni ecologiche da un lato e legittimi intenti di redditività dall'altro, benefici e ricavi attesi sarebbero senz'altro destinati a ridursi (Schul, 1982).

## **1.2 Politiche e problematiche legate alla corretta gestione dei sistemi irrigui**

Le prime misure agroambientali in tale direzione furono introdotte dalla riforma della PAC (*Politica Agraria Comune*) del 1992, mirata ad assistere l'ammodernamento delle aziende agricole con una serie di interventi definiti "misure di accompagnamento" e a diffondere un modello ancora orientato imprescindibilmente al mercato ma, sopra ogni cosa, atto ad assicurare un livello di vita equo e l'autosufficienza alimentare da parte delle popolazioni coinvolte, attestando la

qualità dei prodotti; l'urgenza di affermare uno "sviluppo sostenibile" ha gradatamente spinto il *Consiglio Europeo* ad avviare una serie di iniziative e strategie legislative rivolte in maggior misura alla tutela ambientale; speciale attenzione è stata resa al controllo delle qualità delle acque, in considerazione del fatto che queste, oltre ad essere fonte essenziale di vita per gli abitanti e per le specie presenti (fauna e flora), costituissero da sempre il principale indicatore di qualità per un sistema naturale.

Ne segue l'importanza di valutare rischi e/o incertezze annessi alla cattiva gestione della risorsa idrica, ancor più se di scarsa qualità, sostenendo la continua ricerca di agrotecniche idonee per risanarla e potenziarla; le pratiche colturali in senso lato (lavorazione/concimazione dei suoli, irrigazione, potatura, ecc.) presentano il comune obiettivo di generare o incentivare lo sviluppo di condizioni che favoriscano direttamente la produttività e la qualità del biotipo; un sistema artificiale siffatto serba le medesime caratteristiche funzionali di quello originario, poiché anch'esso "ecocompatibile", ovvero capace di autosostenersi; l'automantenimento ha come cardine fondamentale la custodia e la conservazione del suolo e della sua fertilità legata al ciclo dell'acqua, al clima, alle sistemazioni idraulico-agrarie, alle tecniche colturali e alle modalità irrigue; di contro, aspetti climatici e composizione dei terreni non appaiono i soli elementi da considerare.

Per una visione più ampia del problema, occorre definire un secondo livello di natura strutturale, nel caso dei sistemi irrigui riguardante l'evoluzione tecnologica delle singole componenti di impianto, alle quali sommare esigenze dinamiche di valore strettamente commerciale (strategie di marketing dominanti o vincolanti gran parte delle scelte economiche assunte) in virtù della particolare rilevanza di alcuni prodotti a dispetto di altri; sul fronte opposto, viene appunto a collocarsi l'aspetto relativo alla carenza idrica ad effetto del cambiamento climatico, della sensibile espansione delle aree irrigate e/o del sempre più incisivo e repentino peggioramento della qualità delle acque adoperabili (fenomeni di inquinamento).

Un management che punti a derivare produzioni ideali in tutti i sensi deve trarre un duplice vantaggio economico dalla riduzione e dal contenimento degli sprechi e dei consumi mediante il potenziamento degli impianti medesimi, l'adozione di criteri irrigui confacenti alle tipologie colturali impiantate, anch'esse variabili nel tempo e, nel complesso, secondo misure idonee di efficienza e di ottimizzazione.

In sintesi, il fine ultimo risiede nello sviluppo di un'agricoltura atta ad impegnare l'insieme delle risorse disponibili per adempire a compiti e scopi di competitività e redditività aziendale, o altresì per soddisfarne di nuovi nel rispetto dei consumatori; si avverte la doppia responsabilità di fornire prodotti certificati in termini di sicurezza e sanità, a prezzi accessibili, limitando possibili danni all'ambiente (Sckokai e Moschini, 1993).

L'azienda agricola diviene un'impresa che opera e produce reddito unicamente tramite un uso saggio e programmatico dei mezzi tecnici e delle risorse a disposizione, seguendo normative nazionali e comunitarie a difesa e a sostegno del cambiamento e del progresso in proiezione futura e, pertanto, in un contesto visivo di "Gestione Agricola Integrata" (Henke et al., 1999).

Gli operatori del settore sono tuttora indotti a prevedere possibili fallimenti da parte del sistema, congetturando nuove metodologie per evitarli; un simile sforzo, nei sistemi adulti ed economicamente avanzati come nelle realtà più depresse, viene ampiamente riconosciuto quale obiettivo strategico di primaria ed indiscussa importanza (Pereira et al., 1993).

### **1.2.1 Accorgimenti e correttivi su vasta scala: l'apporto delle misure agroambientali**

Le norme avviate portano anzitutto a fissare tempi, scadenze e modalità di ricognizione per la quantità/qualità delle acque e degli usi a riguardo, economicamente e socialmente giustificati; le nuove opere, presumibilmente accompagnate dalla regolare manutenzione e dal costante monitoraggio dei sistemi preesistenti e non, devono inserirsi in un disegno organico e poliennale su scala territoriale e collocarsi all'interno di un contesto spaziale più ampio (Piani di Bacino).

Il rinnovamento richiede l'identificazione dei distretti idrici, comprendenti anche più bacini idrografici, anche in presenza di differenze sotto l'aspetto pedo-morfologico; ad essi devono corrispondere altrettanti Piani di Gestione, la cui attuazione possa predisporre la segnalazione dello stato d'arte delle opere presenti e il riconoscimento delle interrelazioni tra queste, colture ed ambiente da rivisitare e migliorare. Per ciascun territorio rispondente ad un dato sistema di acque si evince l'obbligo di distinguere e classificare le tipologie agricole dominanti o di stimare i fabbisogni irrigui ad esse attinenti, ma anche di contemplare e prevedere diversificazioni agricole atte a delinarsi in avvenire (inventario delle varietà presenti e future), eventualmente esigenti di apporti idrici superiori o finanche inferiori, se comparati alle presenti o trascorse produzioni.

Ciò porta anche a valutare la richiesta idrica, non più esclusivamente in riferimento alla disponibilità di risorsa presente, ma anche in relazione a quella futura (previsionata, ancor più dal momento che i criteri di irrigazione non sempre evidentemente incontreranno il razocinio); non è un caso che tale distribuzione spaziale di domanda irrigua dipenda, oltre che dal comportamento dei singoli coltivatori, dalle tipologie di coltura e dai processi fisici correlati al suolo e/o al clima delle regioni indagate, quindi da una serie di variabili di entità e definizione complessa (non immediata), necessariamente oggetto di ricerca scientifica (Burt et al., 1997).

Attraverso le azioni indotte sul territorio, anche il bilancio salino dell'apparato idrogeologico può parzialmente o complessivamente modificarsi nei confronti di quello naturale preesistente (antecedente alla progettazione irrigua); la salinizzazione dei corpi idrici da parte delle acque di

drenaggio costituisce un problema di portata ben più ampia del degrado in sé del sottosuolo producibile dall'incremento di salinità all'interno di un dato terreno o substrato.

L'odierna necessità di aumentare i volumi di adacquamento per fabbisogni di lisciviazione (presupposto essenziale per l'impiego delle acque saline di drenaggio) comporta l'inquinamento di tali acque da parte di nitrati, concimi, diserbanti o insetticidi utilizzati nei suoli agricoli (profondo contrasto tra somministrazioni attese e motivati intenti di politica delle acque, tendente ad isolare i terreni agricoli dal ciclo idrogeologico).

Al di là dei limiti normativi vigenti, relativi alla concentrazione totale salina e/o a quella di elementi nocivi, si preferisce solitamente diluire acque emunte dagli impianti con altre di buona qualità, fino a riportare le criticità al di sotto del margine consentito, soluzione quanto mai inopportuna (sprechi di risorse idriche "volontari", vengono accompagnati da parziale se pur calcolata immissione di inquinanti in ambiente) che, tuttavia, si rivela anche la più frequente, date le difficoltà di acquisire informazioni su vasta scala e la limitatezza/insufficienza delle osservazioni, o comunque delle conoscenze sui sintomi e sugli effetti indotti dal fenomeno.

In assenza di sbocchi finali dei canali di drenaggio, aree naturali di ristagno potrebbero accumulare acque irrigue di ritorno e con esse gli inquinanti presenti; pesticidi e metalli pesanti ad elevata concentrazione possono dunque invadere la catena alimentare e successivamente ingenerare fenomeni tossicologici, non escludendo, peraltro, che ai vertici di tale catena possa risultarne contaminato anche l'uomo. La soluzione deve erigersi sull'interdisciplinarietà tra settori e competenze; con esclusivo riferimento all'ambito irriguo, regole e specifici criteri di condotta indurrebbero ad annoverare:

- l'impiego in via separata delle acque di buona e cattiva qualità, in base al livello di tolleranza o sensibilità delle colture e in contrasto alla laboriosa e non sempre attuabile tecnica di unire le due fonti che di rado comporta benefici sul bilancio globale (Letey, 1993); isolamento e circoscrizione delle acque reflue saline farebbero in modo tale che queste non contaminino acque di qualità superiore, promuovendone la destinazione presso trattamenti di risanamento appositi;

- la premessa di una regolare programmazione irrigua, ancora una volta, alla ricerca del più alto grado di efficienza possibile per le stesse tecniche/modalità irrigatorie: portata, tempistiche e cicli di adacquamento si rivelano parametri basilari mediante i quali controllare la nutrizione minerale nel ricambio della soluzione a contatto con le radici (applicazione di dosaggi oculati); nel complesso, influenzando sul quantitativo mineralogico da apportare, contribuiscono favorevolmente alla stessa riduzione del drenaggio in falda; in ultima analisi, per mancata diminuzione dei volumi dispersi o percolati attraverso il terreno, può ricorrersi all'eliminazione dell'irrigazione nelle aree particolarmente a rischio (solo in casi estremi).

- depurazione delle acque in genere per reimpiego a scopo irriguo: l'alternativa alla scarsità di risorse idriche viene sicuramente evidenziata dalla fitodepurazione, una tecnica che prevede il coinvolgimento di elementi vegetali. Posti come parte integrante del sistema, presentano elevate capacità di rimozione degli inquinanti per mezzo di una varietà di processi biologici, chimici, fisici; la cooperazione tra piante e microrganismi (in habitat congeniale allo sviluppo: flora batterica adesa sulle radici o dispersa in prossimità di esse), riveste un ruolo attivo e predominante nel filtraggio e quindi nella disinfezione da reflui in genere (per acque urbane, agricole o industriali).

Sorge di conseguenza la necessità di dover compensare e giustificare i maggiori costi derivanti dalle particolari tecniche indotte, ovvero di pubblicizzare le prerogative di ecocompatibilità mediante una certificazione atta a garantire un prodotto di qualità; incentivi e vantaggi economici devono sollecitare le imprese ad accettare/promuovere tale certificazione ambientale, a prosecuzione di un'attività di ricerca riguardante l'avanzamento o il perfezionamento:

- dei metodi irrigui per garantire la sicurezza e ottimizzare l'uso dell'acqua (peraltro ricordando come determinati adacquamenti superino, anche largamente alle volte, i fabbisogni minimi richiesti dalle piante) e, più di ogni cosa, delle modalità con cui l'irrigazione avviene; erogazioni troppo frequenti e volumi elevati (in relazione a durata e grado delle applicazioni), innalzano i costi economici e ambientali; al contrario, apporti diradati oltremisura e volumi sensibilmente ridotti decrementano la resa produttiva delle colture (stato nutrizionale non ottimale). La soluzione ideale prevedrebbe una sensata e opportuna combinazione delle casistiche appena enunciate: la migliore in assoluto suggerisce l'adozione di contributi modesti, brevemente intervallati;

- dell'efficienza produttiva, anche ad opera dello sviluppo di varietà colturali dal più elevato apporto nutrizionale, osservando che il surplus di soluzione fertirrigante specificamente addotta non si perda a causa del drenaggio in eccesso;

- dei metodi di difesa e protezione del suolo e delle piante, attraverso controlli biologici più frequenti e mirati riguardo al relativo stato nutrizionale (conducibilità elettrica, pH e stessa composizione della soluzione N-P-K: azoto, fosforo e potassio entro range prefissati);

- dell'apporto di letame o sovesci (interramento per alcune tipologie di colture), che accresca la stabilità, ostacolando il degrado del suolo e dei substrati; abusi e/o intemperanze nelle dosi di concime, di contro, acuirebbero le relazioni/reazioni chimiche nella biosfera, inasprando alcuni effetti negativi da stress salino.

Fertilizzazione e salvaguardia delle colture mirano ad affinare la nutrizione nel rispetto delle norme recentemente introdotte dalla *Direttiva Nitrati 91/676/CEE*; a tal proposito, si prevedo-

no una ferma disciplina per le somministrazioni azotate in particolare e una rigorosa verifica del sempre più diffuso e crescente fenomeno di inquinamento da zootecnici e reflui in genere (spandimenti chimici controllati), precisando che fertirrigare significa trasferire e recapitare i fertilizzanti nel punto esatto presso cui saranno assorbiti.

Conducibilità elettrica, pH e composizione della soluzione sono variabili essenziali da sottoporre a monitoraggio costante (ispezione e riesamina dei processi di scambio fra radici e soluzione nutritiva, potendone testare la concentrazione generale); discostandosi dal range ottimale, possono peggiorare vigore e stato nutrizionale delle piante. Se elevate, ad esempio, possono produrre consistenti tensioni osmotiche ad opera di salinizzazione eccessiva (rallenta la crescita delle colture, indotte a spendere più energia per vincere il potenziale); se ridotte, invece, la diluizione risulta massima, con opposti fenomeni di appassimento o avvizzimento.

Le analisi del terreno e delle acque permettono di orientare al meglio l'irrigazione e le singole lavorazioni, la scelta delle varietà colturali e dei portinnesti, e altresì di individuare elementi nutritivi eventualmente carenti, per cui in grado di limitare le produzioni agricole; rilevare la presenza di agenti e costituenti in dosi errate concorre alla corretta diagnosi delle alterazioni e/o affezioni colturali.

Solo alcune specie presentano elevata tolleranza a taluni fattori/elementi chimici, venendo accolte nella classe delle piante "tolleranti" (vi rientrano orzo, asparago, spinacio e barbabietola); più numerose risultano le colture "moderatamente sensibili" (soia, riso, mais, più diverse specie orticole da foraggio), mentre la categoria "sensibile" comprende ulteriori varietà (tra cui il fagiolo, la lattuga, l'arancio, il melo o il pesco). Dal momento che le colture necessitano di apporti di concimazione differenti in relazione alle stesse specie, al periodo fenologico, al tipo di produzione e/o al rapporto di resa singola delle aree interessate, la preparazione della composizione deve rispettare apposite priorità nella sequenza, partendo dai sali meno solubili; si prediligono fertirrigatori che usufruiscano di soluzioni madri distinte, vale a dire dispositivi atti a scindere specificamente sali meno solubili da quelli che lo sono maggiormente.

Altre tecniche, invece, risultano comunemente mirate al risparmio idrico mediante riduzione della traspirazione, di conseguenza contribuendo all'obiettivo generale di adeguamento degli input agronomici (può positivamente derivarne la limitazione dello stato di siccità fisiologica indotto dalla stessa salinità), in ambiente protetto (serre), può ricorrersi all'ombreggiatura con teli in plastica, operazione che può tuttavia presentare l'inconveniente di un eccessivo abbattimento della radiazione solare; una tipologia alternativa di intervento riguarda il contenimento del fattore traspirativo per mezzo dell'incremento del livello di umidità circostante (tecnica non attuabile in pieno campo, a causa dell'impossibilità di agire sull'umidità atmosferica), coinvolgendo diret-

tamente la fisiologia del manto vegetale. Interessanti prospettive, infine, provengono dall'utilizzo degli innesti, metodologia tradizionalmente adoperata per coltivazioni arboree, affermatasi anche nel settore ortivo, allo scopo prevalente di ingenerare una superiore resistenza ai patogeni; agendo sul vigore vegetativo, un portinnesto affidabile può indirettamente assistere la produttività e, più esattamente, correggere il portamento della cultivar da cui è ottenuto il nastro.

### **1.2.2 Interventi strutturali alla scala locale: evoluzione e rinnovamento degli impianti collettivi**

Per L'Italia ed il Meridione in particolare, alla lunga fase di incubazione dei sistemi irrigui, seguirono alcune esperienze infelici, generate e presto aggravate da numerosi fattori devianti, indotti dal quadro istituzionale-socio-politico dell'epoca. Prima e Seconda Guerra Mondiale snaturarono e stravolsero compiti e visione dell'impostazione originaria, ad eccezione di talune parentesi piacevolmente positive, tra cui l'intensa azione di bonifica risalente agli anni '20, seguita dal graduale ripopolamento dei latifondi con avvio alla realizzazione delle prime opere in ottica consortile. Impedimenti e svantaggi furono anzitutto dovuti alla scarsa continuità/tempestività di intervento, alla limitatezza delle competenze/conoscenze e alla pressoché totale assenza di razionalità e capacità di analisi nei confronti delle problematiche esistenti, da ultimo accentuando e aggravando le difficoltà incontrate dal Paese nella prima metà del XX secolo e, di qui, il divario nei confronti di alcuni territori del centro-nord Europa o del resto del mondo.

Alla fine del dopoguerra, i comprensori irrigui erano prevalentemente localizzati nelle regioni settentrionali, in favore dell'85% della superficie agricola; solo a partire dagli anni '50, anche nel Mezzogiorno si diede inizio alla realizzazione di impianti collettivi al servizio di aree di notevole estensione; alcune reti di distribuzione, in canalette prefabbricate a pelo libero, giunsero di lì a poco ad avvalersi dei primi strumenti di misura e regolazione.

La principale criticità dei sistemi a gravità risiede nel grado di scarsa efficienza con la quale essi operano, evidenziata dalla grave entità delle perdite d'acqua dal punto sorgente all'utenza finale; sviluppo ed adozione di specifiche apparecchiature di controllo possono però incrementare il livello prestazionale, arginandone la vulnerabilità: valvole o paratoie inducono a ridurre gli spechi, ostacolando in via temporanea la circolazione all'interno dei canali (ne deriva una più efficace ripartizione delle risorse in seguito all'apprendimento e alla globale analisi delle dinamiche di flusso o portata).

All'oggi, dispositivi automatici che consentano la direzione di organi mobili possono essere ben impiegati per la gestione di grandi canali adduttori, ma un controllo di tipo dinamico centralizzato pone ancora problematiche legate alla lentezza con la quale rispondono taluni collegamenti idraulici; l'eccellente grado di taratura e sofisticazione, innegabilmente raggiunto dalle ap-

parecchiature di direzione e controllo, non consente in sé (non da solo o non interamente) di assorbire ripercussioni annesse all'insufficienza di procedure interamente soddisfacenti e convalidate, oppure dovute, come spesso avviene, ad imprudenza/inesattezza e dannosità di alcune scelte gestionali; al mondo si osservano solo pochi esempi di reti al servizio di grandi utenze controllate dinamicamente (Lefebvre, 1977; Yeh et al., 1980), opere su vasta scala abili a sfruttare la presenza di centrali operative collegate via radio o via cavo, con misuratori di livello e di portata ed attuatori per la successione e la manovra degli stessi dispositivi.

Favorire l'analisi e la progettazione degli automatismi necessari atti al ricoprimento di gap strutturali o concettuali non risulta sempre immediato; la vera risposta al quesito di carattere gestionale non risiede evidentemente nella semplice conquista di standard tecnologicamente avanzati per le singole componenti di sistema, ma nella globale sinergia con cui esse potranno operare (dinanzi ad accorgimenti inefficaci o inadatti le perdite d'acqua tenderebbero a manifestarsi in ogni caso elevate, ancor più nel caso di reti e complessi irrigui asserventi ampi areali).

L'intervento più frequente di riabilitazione degli impianti distributivi consiste pertanto nel sostituire condotte in pressione alle preesistenti reti a pelo libero, ove, accanto ai vantaggi indubbiamente derivanti da un training con minori vincoli per i consorziati, diviene logico riscontrare un'intensa riduzione di problemi gestionali legati alla direzione, alla verifica dei prelievi, al controllo delle perdite e alla manutenzione complessiva dell'intero apparato, per un conseguente incremento dell'efficienza globale; tali reti, inoltre, più e meglio si prestano ad un tipo di esercizio decisamente versatile, "alla domanda" (o su richiesta), dall'esclusiva prerogativa di poter essere agevolmente governate da valle, in sostituzione del rigido, peraltro decadente, principio rotazionale (orario o a turnata).

Pur non comportando alcuna restrizione nei confronti della frequenza, oltre che della durata delle singole applicazioni irrigue, l'intrinseca flessibilità del criterio irriguo presume anche superiore capacità di immagazzinamento da parte del sistema e diametri di dimensione maggiore per erogazioni in condizioni di punta teoriche (costi notevoli in fase di realizzazione); ridurre i costi, frenando al tempo stesso l'eccessivo sfruttamento della risorsa, appare comunque possibile limitandone la portata in uscita; un sistema così risultante si definisce nuovamente alla domanda, ma "per flusso limitato" (Merriam, 1987).

In seguito all'attuazione e all'entrata in esercizio dei primi impianti in pressione, comunque al fine di concretizzare le molteplici indicazioni progettuali di cui si discute, si è nuovamente avvertita l'esigenza di introdurre apposite apparecchiature idrauliche di intercettazione, regolazione e controllo; nel caso specifico, trattasi di dispositivi atti ad evitare prelievi indiscriminati da parte degli stessi utenti (negatività che potrebbero indurre valori di pressione inferiori ai limiti previsti,

da cui disfunzioni e/o anomalie all'intera rete consorziale); in tal senso, di indiscussa e tangibile efficacia si è mostrato l'inserimento dell'elettronica nei dispositivi di consegna impegnati per la verifica dei volumi erogati, sia presso i reparti nei quali si suddivide un comprensorio, sia presso le singole aziende, sia infine, quando possibile, presso aree particolarmente frazionate in termini di possedimenti o proprietà. Tali "gruppi di consegna" si compongono di idrovalvola, contatore volumetrico, limitatore di portata ed apposita interfaccia per la lettura dei consumi; le recenti tipologie abbinano alla presenza dei contatori appropriate tessere ad esaurimento (in forma di ricarica prepagata), consentendo di comparare le uscite distintamente prodotte dai modelli di simulazione con i prelievi realmente avvenuti/appuratisi da caso a caso.

In definitiva, il duplice obiettivo della programmazione irrigua nei sistemi alla domanda si rivela quello di "abbattere i costi ottimizzando i processi" attraverso l'ammodernamento.

Viene altresì consentito un esercizio cui venga restituita ampia libertà agli agricoltori in ragione della scelta specifica dei tempi di adacquamento e, più in generale, dei metodi atti a coordinare e disciplinare l'erogazione internamente alle aziende.

### **1.3 Conoscenze e strumenti per la gestione integrata dei sistemi irrigui**

Di fianco ad interventi di tipo ambientale e strutturale (insieme di metodologie e tecnologie innovative volte al perfezionamento dell'esercizio irriguo e dell'efficienza di impianto), una corretta gestione irrigua deve anzitutto avvalersi del contributo di conoscenze approfondite nel merito dei processi fisici che interagiscono nell'attività di un dato sistema; nozioni di base o applicate sui fabbisogni irrigui delle colture risultano essere abbondantemente documentate in letteratura; ciò nonostante, da parte degli Enti erogatori, si avvertono il dovere e l'esigenza di estendere o implementare le antefatte esperienze, indirizzando l'adozione di tali strumenti e la qualità della gestione anche in altra direzione, ovvero in riferimento ad una dimensione spazio-temporale più o meno ampia, quale potrebbe tipicamente rivelarsi una scala a livello di distretto irriguo.

#### **1.3.1 Modelli di bilancio idrologico e metodologie per la stima indiretta dei parametri**

La crescente disponibilità di modelli di calcolo avanzato consente di valutare nel dettaglio i processi di trasporto di acqua e soluti o di scambio di massa ed energia all'interno del complesso "suolo-pianta-atmosfera" o, ancora, di eseguire la verifica idraulica delle reti distributive per distinte condizioni di funzionamento.

La prima tipologia conduce all'ottimizzazione delle strategie di azione, rendendo interventi irrigui tempestivi e volumi di adacquamento appropriati in funzione di colture e condizioni pedo-

climatiche differenti; risulta possibile elaborare/analizzare i diversi termini del bilancio idrologico pervenendo alla stima dettagliata dei fenomeni di stress, da cui i corrispondenti deficit idrici, con cadenza temporale giornaliera, da affiancare ad una data distribuzione spaziale di fabbisogni irrigui e conseguenti prelievi (se noti) nei singoli nodi della rete. Si offre quindi l'opportunità di osservare l'evolversi dei potenziali e dei contenuti idrici (nel suolo, come nella zona propriamente interessata dall'apparato radicale), fino a ricavare la stessa quantità/consistenza degli attingimenti, o, ancora, possono ottenersi i consumi delle colture in funzione del livello freatico (anche in favore della scelta del calendario delle somministrazioni impiegate), altresì distinguendo riduzioni di produttività per apporti idrici inferiori (Bastiaanssen et al., 2004).

Prescindendo dal modello di simulazione idrologica adoperato, conviene sempre realizzare una netta separazione tra due distinti livelli e/o tipologie di dato:

- informazioni sulle caratteristiche fisiche, morfologiche e topografiche dell'area in studio, essenzialmente invariabili nel tempo;

- informazioni su altri parametri ambientali e colturali, tendenzialmente variabili nel tempo e, pertanto, nel corso delle stagioni indagate.

Il primo gruppo include dati concernenti le proprietà fisiche e idrauliche dei suoli (funzioni di ritenzione e conducibilità, spessore degli orizzonti, trasmissività degli acquiferi) e gli elementi topografici di maggior rilievo (canalizzazioni principali, viabilità, presenza di agglomerati urbani), contribuendo alla definizione delle aree indagate e all'identificazione di zone omogenee interne a tali aree; la seconda categoria comprende informazioni sull'uso del suolo e sulla copertura vegetale, sul livello freatico, sui volumi d'acqua disponibili e dati meteorologici, interamente ad effetto di un regolare monitoraggio secondo scadenze prestabilite.

Uno dei principali limiti nell'applicazione di tali strumenti si lega alla conoscenza della variabilità spaziale dei parametri dei suoli e delle colture alla base del processo di simulazione idrologica; in ragione di perplessità o incognite legate alla scala di applicazione, le informazioni disponibili appaiono spesso rivolte alla sola classificazione granulometrica dello strato superficiale di terreno; per le colture, può tuttavia ricavarsi la distribuzione delle tipologie presenti attraverso curve di crescita standard, legate alla data di inizio/fine del ciclo colturale o fenologico sulla base di considerazioni puntuali, per lo più attinenti a consuetudini presenti in situ, nel preciso intento di approssimare/approdare alla realizzazione di mappe di uso del suolo.

Metodi indiretti o PTF (Pedo-Transfer Functions) portano invece a definire i parametri idrologici del suolo tramite algoritmi di calcolo che utilizzino dati in ingresso già disponibili o agevolmente misurabili (minimo sforzo nella valutazione alla scala idrologica aziendale, pur se lievemente

te a spese della precisione nella stima delle proprietà idrauliche a cui si perviene); può quindi effettuarsi un raffronto inerente a set di dati di origine distinta, misurati dall'esperienza in laboratorio ed ottenuti dalle stesse pedo-funzioni. I risultati alla scala aziendale recano indicazioni utili per la taratura di queste ultime; vi seguono applicazioni a differente scala territoriale (distretto irriguo); in questa stessa memoria risulta possibile apprezzare l'influenza della parametrizzazione idrologica in relazione alla risposta modellistica delle colture annesse all'area di studio.

### 1.3.2 Indirizzo informatizzato nella gestione: telerilevamento e sistemi decisionali di supporto

Sistemi e tecniche di rilevamento satellitare (*Remote Sensing*) consentono di dedurre ulteriori informazioni sui fabbisogni idrici per interi comprensori (Menenti et al., 1990; FAO, 1995); accanto all'identificazione dell'uso del suolo e quindi delle zone irrigate, l'osservazione remota della superficie terrestre in particolari regioni dello spettro elettromagnetico agevola la determinazione delle caratteristiche del manto vegetale, quali la frazione di copertura del suolo stesso  $s_c$  (*soil cover*), l'indice di area fogliare *LAI* (*Leaf Area Index*) e il coefficiente colturale  $k_c$  (*crop coefficient*), unitamente impegnate nella definizione degli input necessari al contorno superiore del modello di simulazione idrologica e colturale; ad esse, dovranno necessariamente accompagnarsi misure agrometeorologiche riguardanti piovosità ed evapotraspirazione delle colture.

L'osservazione della terra dallo spazio prosegue tutt'oggi di pari passo con lo sviluppo delle sonde artificiali, delle telecomunicazioni satellitari e dei sensori (su satelliti in orbita o aviotrasportati); oltre a fornire dati di tipo numerico, i dispositivi di acquisizione possono restituire misure di radianza interagenti con le aree fisiche di interesse, in dosi singole (attraverso radiometri o spettroradiometri) o di insieme (immagini digitali da macchine fotografiche, apparecchi a scansione e termocamere). Gli stessi strumenti utilizzati si definiscono sensori passivi, se misurano la radiazione elettromagnetica emessa, riflessa o trasmessa, proveniente dagli superfici investigate, o attivi, se provvedono essi stessi all'illuminazione delle facciate e/o dei singoli oggetti (*target*), captando radiazioni elettromagnetiche di ritorno (*backscattering*); in particolare, l'attuale disponibilità di satelliti ad alta risoluzione (Landsat, Spot, Ikonos, IRS, Aster, Quickbird, ecc.) offre la possibilità di monitorare, con discreta precisione, anche campi di minuscole dimensioni.

Per ogni tipologia di satellite, si demandano ai software compiti e funzionalità di combinare bande prescelte, ottenendo di volta in volta, a seconda delle esigenze, immagini in veri (RGB, combinando le tre del visibile) o in falsi colori (tre bande a caso), con sintesi additive o sottrattive (noto che da ciascuna di esse ne derivi sempre un raffigurazione in scala di grigi, il colore resta di fatto una convenzione successivamente adoperabile); si producono fotografie visivamente analizzabili, oppure immagini (raster o vettoriali) ad interpretazione sia visuale che digitale.

Considerata la capacità di estrarre informazioni inerenti i parametri ambientali, sia nel breve termine che a distanza, risultati e/o potenzialità offerte dal metodo di rilevamento satellitare si rivelano senz'altro notevoli; tra gli altri pregi si includono:

- la non invasività (tecnica non distruttiva), ovvero imperturbabilità per gli oggetti osservati da cui l'estrema oggettività del metodo (dal carattere sia qualitativo che quantitativo);

- la forte omogeneità e la notevole precisione del rilevamento, ad elevata copertura temporale ancorché spaziale (con frequenti ripetute, alle volte in modalità pressoché continua);

- l'acquisizione di firme spettrali associate agli oggetti scansionati (per essi, ne rappresentano l'attitudine alla riflessione in funzione della lunghezza d'onda della radiazione solare incidente), fin oltre il visibile, nei campi dell'infrarosso e del termico;

- la sicura affidabilità economica rispetto ai metodi di misura più convenzionalmente e comunemente sviluppati/impiegati nella gestione del territorio e nel monitoraggio ambientale;

- le vaste capacità di adozione, con evenienze e propositi di applicabilità in numerosissimi ambiti: agricoltura, botanica e scienze forestali in genere, climatologia, topografia, idrogeologia, telecomunicazioni, media e turismo (pubblicità, educazione, analisi delle proprietà, valorizzazione territoriale), ambiente e gestione del rischio per previsione e controllo di dinamiche inquinanti (anche in presenza di discariche e rifiuti urbani/industriali) e catastrofi in genere (frane, dissesti, movimenti tettonici e subsidenze continentali, eruzioni vulcaniche, alluvioni e terremoti, fenomeni di erosione costiera, eventuale distacco di aree glaciali o periglaciali, ecc.), comportando il monitoraggio di obiettivi puntuali e/o strategici (valutazione del danno eventualmente derivante/producibile o già recato da particolari contingenze o azioni).

L'immissione dei dati derivanti dall'elaborazione delle immagini satellitari all'interno di un Sistema Informativo Territoriale semplifica lo scambio di informazioni in riferimento al modello prescelto; per opera dei Sistemi Informativi Geografici (*Geographic Information Systems*) è possibile gestire comodamente sia elementi in formato vettoriale, riguardanti la geometria delle reti di distribuzione o i limiti delle aree irrigate, che in formato raster, quali singole aerofotogrammetrie, mappe tematiche e/o finanche le stesse immagini ottenute dal telerilevamento.

Software atti a trattare dati georeferenziati semplificano peraltro la rappresentazione cartografica degli output ottenuti, per una lettura separata, pratica e immediata; in sintesi, il GIS raffigura il nodo essenziale di scambio della totalità dei flussi (entranti o uscenti) e dei livelli informativi/procedurali interdipendenti: algoritmi di simulazione per bilancio idrologico e trasporto in rete, dispositivi di rilevamento ed utente finale rappresentato dal gestore.

In un tale contesto, strumenti decisionali di supporto possono migliorare significativamente la gestione degli impianti irrigui, riguardando prevalentemente reti o sistemi di condotte in pressione, dal momento che il metodo su domanda offerto potrà rivelarsi il più flessibile, oltre che il meno esposto a restrizioni/vincoli di sfruttamento della risorsa da parte degli stessi utenti.

In termini più generali, un DSS (*Decision Support System*) consiste nell'insieme dei mezzi hardware/software per esplorare il complesso di variabili influenti sul comportamento del sistema analizzato (diagnosi), così da valutarne la risposta ad opera di interventi specifici (prognosi); facendo interagire più strumenti e dispositivi di rilevamento, simulazione e verifica, abbinati alla gestione di grandi archivi di dati, risulta possibile riprodurre differenti scenari, identificando per ognuno di essi eventuali situazioni di crisi, dovute ad imperfezioni strutturali o alla scarsa efficacia nella direzione degli impianti collettivi, oppure a carenze ed effettive limitazioni di disponibilità idrica, causa richieste elevate (Rey e Hemakumara, 1994).

Ne deriva che un sistema siffatto richieda comunque il controllo dei volumi erogati, ovvero delle portate prelevate dalle utenze, a partire da conoscenze tecniche (programmatiche e gestionali in ambito irriguo), ma anzitutto teoriche, concernenti l'adozione e l'elaborazione dei modelli di simulazione fin qui descritti, specificatamente calibrati e validati per le condizioni di ciascuno studio.

L'azione congiunta di tali metodologie di analisi rappresenta quanto di più avanzato la comunità scientifica internazionale risulti attualmente in grado di proporre, oltre che nel merito delle potenzialità esplicabili (range più o meno efficace di scelte/opzioni/strategie ammissibili), anche al riguardo del ventaglio di possibilità applicative (duttilità e praticità d'uso, intuitività e funzionalità dei comandi, accuratezza/attendibilità dei risultati) nell'esame complessivo dei processi idrologici in ambito agrario e forestale (Feddes et al., 1988).

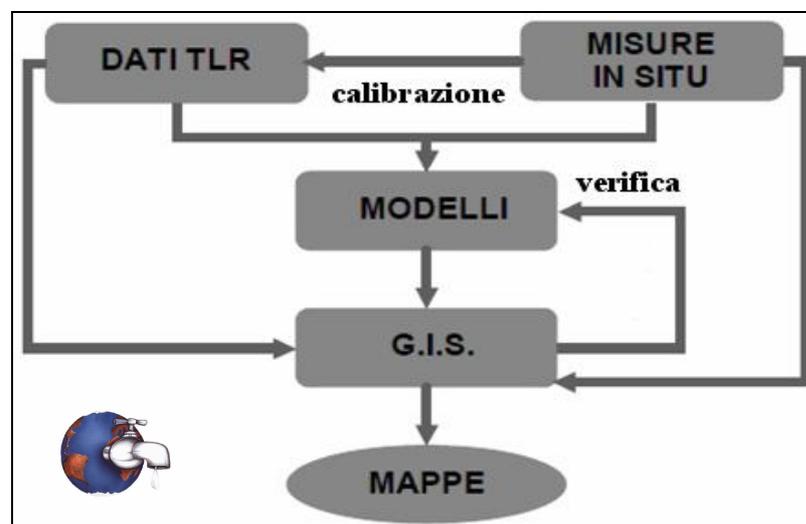


Fig. 1.1 - Il GIS quale collegamento tra misure dirette/indirette, algoritmi di calcolo e flussi informativi.

#### **1.4 Valutazione dell'efficienza degli interventi irrigui**

Sviluppo e perfezionamento delle tecniche e degli strumenti annoverati risultano sempre da destinarsi all'incremento dell'efficienza irrigua che, come osservato, rappresenta uno dei fondamenti primari della ricerca nel settore agrario; accanto alla necessità di affinare o correggere singole componenti di sistema, si collocano il dovere e l'esigenza di sanare e ottimizzare l'universo rurale nella sua interezza attraverso misure di interesse specifico, utilità ed omogeneità; ne conseguono il laborioso ricorso alla modernizzazione dei complessi preesistenti, la messa a punto, la sperimentazione ed infine l'adozione di procedure, mezzi e tecnologie innovative, accompagnate ed integrate dalle recenti forme gestionali atte al potenziamento dell'ambiente fisico, ma anche al debito e richiesto ampliamento degli automatismi, delle conoscenze o delle competenze (idoneità organizzativa e facoltà cognitiva degli operatori coinvolti).

È anzitutto opportuno ricordare come il concetto di efficienza irrigua provenga dal rapporto adimensionale tra grandezze fisiche equidimensionate, rispettivamente, risorsa realmente immagazzinata dal sistema e complessivamente apportata allo stesso, mentre l'efficacia risulti la capacità di produrre l'effetto adeguato (il più conveniente) per mezzo di tale quantità; essa esprime la misura del volume reso effettivamente disponibile per le colture (all'interno dell'apparato radicale) nei confronti di quanto prelevato alla fonte, rappresentando un quantitativo di risorsa utilizzata al netto delle perdite prodotte lungo il tragitto nelle fasi di adduzione, trasporto e distribuzione (per inadeguatezza del metodo irriguo adoperato, prelievi indiscriminati non autorizzati o, infine, perdite fisiche per flussi evapotraspirativi, percolazione, ecc.).

Il nodo centrale del problema viene dunque raffigurato dal significato o, meglio, dal peso di queste ultime nei confronti di quanto pervenuto globalmente al sistema; occorre inoltre tener presente come parte delle risorse approvvigionate, non giunta a disposizione delle aree irrigabili, ritorni al sistema idrologico (acquiferi e corsi d'acqua) risultando nuovamente disponibile a valle; a meno di circostanze eccezionali, l'efficienza irrigua ritrae sempre limitati vantaggi a livello di bacino idrografico, visibilmente in contrasto con quanto avviene alla scala locale (comprensoriale), ove, mirati accorgimenti di sistema (logici, funzionali o strutturali), potrebbero indurre a benefici notevoli attirando il subitaneo e positivo consenso da parte delle comunità irriganti.

Ridurre o contenere le perdite porterebbe a spiegare e ad evidenziare la maggiore o minore validità e/o efficacia delle tecniche adottate; dai metodi irrigui gravimetrici (sommersione, scorrimento superficiale, infiltrazione laterale da solchi) a quelli per aspersione o localizzati a bassa pressione (impianti a goccia, spruzzo, zampillo e subirrigazione capillare), l'efficienza può notevolmente variare (da valori inferiori al 50% a livelli medi del 70% o superiori al 75-80%, fino a raggiungere punte del 90%).

EFFICIENZA COLLETTIVA (da trasporto, tipo distribuzione e consegna aziendale)	
con canali in terra	0,45-0,85
con canali rivestiti	0,70-0,90
con condotte in pressione	0,85-0,95
EFFICIENZA AZIENDALE (da trasporto e tipo distribuzione in reti singole/individuali)	
con canali in terra	0,70-0,95
con canali rivestiti	0,90-0,98
con condotte in pressione	0,95-0,99
EFFICIENZA DI ADACQUAMENTO (specifica per tecnica/modalità irrigua adottata)	
metodi ad espansione superficiale (sommersione permanente esclusa)	0,45-0,80
aspersione	0,60-0,85
microirrigazione	0,75-0,90

Tab. 1.1 - Valori indicativi dell'efficienza irrigua.

In riferimento al tratto di rete irrigua interessato (collettivo o aziendale), valori più specifici e dettagliati inerenti ad entità e ripartizione delle perdite sono desumibili dalla letteratura scientifica, come mostrato in tabella (Tournon, 2003).

Risulterebbe ridondante verificare come la gran parte degli sprechi o delle perdite d'acqua maggiori si riferisca alla categoria delle reti a pelo libero e dei metodi gravitazionali in genere: in questi casi, recenti stime a livello mondiale hanno proposto un valore di efficienza irrigua media e complessiva di poco superiore a 0,4 (il 60% della risorsa approvvigionata viene a smarrirsi durante di trasporto e in fase di consegna/adacquamento); se ne deduce come, in merito all'apporto netto che si intenda concretamente offrire alle utenze, il prelievo iniziale andrebbe sensibilmente maggiorato per tener conto dell'inevitabile dispersione e del grado di inefficienza delle tecniche adottate. Ciò appurato, la natura strutturale del problema non parrebbe la sola indiziata ad alimentare cause di scarsa efficienza; a fronte di inediti, giusti e crescenti bisogni di ottimizzazione degli usi al riguardo, la ricerca in agricoltura potrebbe ugualmente riscoprirsì come condizionata da numerose incognite: prima tra tutte, vi sarà quella legata ai poteri decisionali sul momento di intervento irriguo e sul dosaggio applicato da parte dell'agricoltore (facoltà fortemente ridotta per irrigazioni collettive con dispensa a turnata). Potrebbero altresì rivelarsi limitate le stesse possibilità di azione nel massimizzare l'efficacia del metodo in privazione di incentivi economici.

In ultima analisi, in caso di risorsa idrica particolarmente insufficiente, potrebbe comunque delinearsi l'esigenza di contenere scompensi e/o ripartizioni non programmate, da cui il duplice rischio di danni ai raccolti e alle produzioni; tali variazioni giornaliere potranno accogliersi prevedendo, quando e se possibile (ad esempio in presenza di consistenti dislivelli topografici), capacità di compenso localizzate (vasche di sconnessione a pelo libero) che, in condizioni di regime, consentirebbero di arginare le pressioni in rete entro limiti prefissati, senza forzatamente ricorrere alla centralizzazione dei comandi (regolazione locale); appurare e ridurre le suddette va-

riazioni in volume promuoverebbe ulteriormente l'efficacia del criterio adoperato (incremento di efficienza globale quale somma di contributi locali dedotti da ciascuna componente di impianto).

Identificate le principali cause di ridotta efficienza, di tipo strutturale e/o gestionale, si evidenziano interventi caratteristici da apportare in funzione delle stesse regole di gestione e di esclusive metodologie atte a valutare l'efficienza dell'irrigazione sulla base specifica di fattori o principi di valutazione per l'efficienza irrigua; trattasi di indicatori esprimibili a partire dai volumi distribuiti o ad effetto determinati parametri, normalmente identificati dalle misure (dirette o indirette) e dagli stessi modelli di bilancio idrologico e simulazione colturale adoperati, tra i quali ad esempio: indici di equità della distribuzione, soddisfacimento dei fabbisogni irrigui massimi e di efficacia dell'irrigazione o beneficio marginale (par. 5.3.4).

## **1.5 La proposta di ricerca**

Un approccio interdisciplinare, quale appunto quello fornito da uno strumento di supporto decisionale, esteso all'ambito distrettuale del "Boscariello", all'interno del Consorzio di Bonifica Destra Sele (Eboli, Salerno), può indubbiamente rivelarsi il più valido, oltre che il più efficace, nell'affrontare e risolvere problematiche di pianificazione, allocazione e gestione delle risorse idriche in campo agrario.

Almeno concettualmente, e finanche sotto il profilo dei contenuti riguardanti le distinte tematiche da sostenere, potendo non a caso integrare informazioni telerilevate, dati spaziali e algoritmi di simulazione idrologica, la ricerca in oggetto risulta essere per molteplici aspetti correlata a quanto già precedentemente avvenuto in altra sede; alcuni dei DSS proposti in letteratura costituiscono l'imprescindibile punto di partenza dell'odierna riproposizione in ambiente "SIMODIS" (*SIMulation of On-Demand Irrigation Systems*; D'Urso, 2001).

In un simile contesto, la vera novità viene rappresentata dall'ampliamento che segue le fasi di spazializzazione dati, calibrazione dei parametri (se necessaria) e di stima del fabbisogno irriguo. Lo stesso significato del termine "irriguo" risulta dunque investito di un contenuto più ampio, nella sua complessità ed interezza, ove a quesiti e/o aspetti presumibilmente inerenti singole unità poste a coltura, di carattere prettamente agronomico, potranno affiancarsene altri di sempre più crescente attualità, evidenziando ancora una volta pregi, meriti, intendimenti e interessi legati ad un'esperta gestione, per cui in relazione:

- all'ipotesi di ridimensionamento idraulico della rete in pressione, a seguito del risparmio idrico raggiunto per inedite distribuzioni di portata, che, compatibilmente al modello di bilancio adottato, non potranno in alcun modo prescindere dal risultato delle simulazioni condotte e degli

studi effettuati; l'impiego di diametri di dimensione inferiore comporterebbe vantaggi apprezzabili sotto il profilo economico, anche in casi analoghi;

- ad indicazioni complessive sui volumi irrigati in eccesso, per differenti scenari di gestione, con evidente rimando e attinenza alla produzione di impatti ambientali minori e, più esplicitamente, al contenimento dell'apporto di sostanze azotate liscivate in falda;

- al calcolo di indicatori per la valutazione di strategie alternative, legati al concetto di efficienza irrigua, in funzione del presente apparato di collegamenti idraulici ed ancor più in dipendenza delle prestazioni delle unità secondarie di sistema; quest'ultimo elemento figurerà prevalere per una scala comprensoriale siffatta, pur prescindendo dalla particolare tecnica di irrigazione implicata.

## **1.6 Organizzazione del lavoro**

In seguito all'esposizione del concetto e dell'utilità dell'impiego degli strumenti decisionali di supporto, secondo l'approccio deterministico intenzionalmente richiamato e la singolare interpretazione (alla differente scala) dei casi di DSS illustrati (capitolo II), il presente studio intende anzitutto mostrare come risulti possibile identificare alcuni parametri e/o relazioni che descrivano in maniera concisa il funzionamento globale del sistema irriguo di condotte in pressione prescelto, per un tipo esercizio alla domanda giornaliera (capitolo III).

Ciò sarà avvenuto in presenza dell'idonea definizione dell'area indagata e della rappresentazione della variabilità spazio-temporale di clima, suolo e vegetazione, riguardanti la stessa area nell'intervallo temporale designato (stagioni irrigue di riferimento 2007/2008), quale insieme di fattori interconnessi all'interno dell'esame applicativo previsto (capitolo IV).

Da ultimo, l'adozione combinata dei modelli di trasporto idraulico in rete (applicazione del SIMODIS alla scala globale di impianto) e di bilancio idrologico (simulazione SWAP nel sistema suolo-pianta-atmosfera, alla scala locale delle parcelle irrigue) si sarà rivelata indispensabile ai fini del conseguimento dei propositi enunciati (capitolo V).

## **2.1 Significato dei sistemi decisionali di supporto nella gestione delle risorse idriche**

La modernizzazione dei sistemi irrigui ha consentito in diversi casi una radicale trasformazione degli ordinamenti colturali, visibilmente accompagnata da una sensibile riduzione riguardo la disponibilità di risorse idriche.

Come riscontrato nella parte introduttiva, quesiti di indubbia rilevanza riguardano l'obiettivo aumento del costo dell'acqua e la crescente richiesta per usi eterogenei e discordanti ad opera della pressante conflittualità tra i distinti settori, ovvero del deciso incremento di domanda a fronte della profonda esigenza di ritrovare equilibri inediti in merito all'accesso, all'assegnazione e all'erogazione delle stesse risorse; tutto questo avviene in presenza di ulteriori, concomitanti e negativi fattori, quali il cambiamento climatico su scala planetaria o il depauperamento delle singole fonti di approvvigionamento, spesso abbinato a repentini e diffusi fenomeni di inquinamento delle acque sotterranee.

La sostenibilità richiede valutazioni su aspetti sociali, economici, istituzionali e ambientali, elementi da tenersi in debita considerazione nella pianificazione ai diversi livelli: globale, nazionale, regionale e locale.

Si pone dunque il problema di migliorare l'efficienza di tali sistemi, attraverso una più razionale utilizzazione e ripartizione dell'acqua irrigua, ivi inclusa la revisione dei criteri di tariffazione (tradizionalmente legati alla superficie asservita più che al consumo effettivo), richiedendo l'approfondita conoscenza dei processi di scambio di massa ed energia che intervengono nel sistema suolo-pianta-atmosfera regolandone l'articolato e composito funzionamento, unitamente al controllo dei fabbisogni irrigui e delle corrispondenti portate prelevate dalle singole utenze.

Il progresso tecnologico, seguito dalla rapida espansione dell'elettronica e dalla conseguente diffusione di elaboratori di capacità standard per la raccolta/implementazione/trasmissione dati (*data processing*) ha incoraggiato l'evoluzione di nuove prospettive di analisi; accanto al rilevamento/osservazione dei principali parametri interessati ed ai modelli di simulazione del bilancio idrologico, algoritmi per la verifica idraulica delle reti distributive in pressione possono all'oggi impegnarsi nel potenziamento e nello sviluppo di opportuni sistemi di supporto alle decisioni per la gestione dei complessi irrigui, e, più in generale, anche in altri ambiti o settori (bancario, medico, istituzionale, demografico, ecc.), col preciso intento di agevolare il processo organizzativo aziendale e di fornire metodologie atte ad affrontare temi di variegata natura.

Preceduti agli inizi degli anni '50 dai TPS (*Transaction Processing Systems*) per la gestione di attività aziendali ripetitive ai livelli più bassi dell'organizzazione, come la fatturazione o la gestione degli stipendi, e successivamente integrati dai MIS (*Management Information Systems*) con l'obiettivo di estendere il supporto anche ai livelli più alti di tale assetto, estraendo ed eventualmente aggregando i dati contenuti nei TPS, i DSS (*Decision Support Systems*) ne costituirono il passo seguente e, per certi versi, anche la sostanziale fusione; il nuovo database doveva includere in sé informazioni già opportunamente associate o comunque raggruppate secondo precisati criteri (Lazzerini, 2010).

Parallelamente alla diffusione di questi ultimi, nacquero anche gli ES (*Expert Systems*), atti ad equipaggiare il gestore o manager di specifiche competenze in determinati campi applicativi, conoscenze che, in genere, non sempre o necessariamente possiede, potendo in definitiva ricorrere a collaboratori ed esperti esterni all'azienda; il sistema risultante viene in tal caso riconosciuto come KDSS (*Knowledge-based Decision Support Systems*).

La differenza tra i due si rivela alquanto sottile: mentre un DSS consente l'utilizzo di nuovi o preesistenti modelli (permettendone la modifica, la creazione, l'inserimento) e la combinazione tra valutazioni umane e tecniche di ottimizzazione che elaborano informazioni in esso contenute, un ES è perfino in grado di prendere decisioni "da solo", allorquando obiettivi ed eventuali vincoli non risultino esprimibili in termini quantitativi (o lo siano soltanto parzialmente).

A completamento di questa breve panoramica sui sistemi decisionali, occorre infine far riferimento ad un'ultima categoria, siglata EIS (*Executive Information Systems*), rivolta ai gradini più alti della gerarchia aziendale (*top management*), abile a porgere informazioni in tempo reale mediante un'interfaccia confidenziale, intuitiva e lineare, seppur meno flessibile rispetto al caso dei DSS (analisi "preconfezionata").

Più in generale, i DSS forniscono supporto ai manager e a tutti coloro che si ritrovino impegnati nel prendere decisioni strategico-operative dinanzi a problematiche poco (o non) strutturate, non sempre risolvibili dalla sola ricerca operativa; come osservato, consistono nell'insieme dei mezzi hardware/software per esplorare il complesso di variabili che determinano il comportamento del sistema analizzato, per poi valutarne la risposta in seguito ad interventi specifici.

### **2.1.1 La gestione dell'informazione: preprocessing e data mining**

L'informazione è un bene a valore crescente, necessario per pianificare e controllare le attività produttive; costituisce la materia prima, poi trasformata dai sistemi informativi. Purtroppo, l'equazione "dati = informazione" non risulta sempre corretta; un eccesso di dati può rendere ardua la ricerca o l'estrazione di informazioni significative.

Occorre dapprima separare dati generati dall'insieme delle operazioni di gestione, contenuti nel database aziendale (*operational database*) dai dati utili al processo decisionale (*data warehouse*), che non devono contenere sottoinsiemi del primo, ma una versione da questi sviluppata, migliorata a valle di *preprocessing*, includente *data cleaning* o pulizia (prevede l'eliminazione di possibili errori, la validazione/valutazione dell'insieme dati medesimo e la definizione/deduzione di meccanismi comportamentali ipotetici) per analisi focalizzate su unioni e/o tendenze, piuttosto che sulle singole operazioni di gestione; l'informazione necessita pertanto di essere memorizzata per distinti livelli di aggregazione, così che il decisore possa analizzarla da diversi punti di vista, alle differenti scale rinvenute, sostanzialmente mutando e arricchendo il dato di partenza.

Il principale scopo di un DSS è non a caso quello di convertire o di estrarre flessibilmente, in tempi brevi e da un'estesa mole di dati, informazioni, associazioni e relazioni originariamente sconosciute all'utente, utili a supportare e migliorare, in termini di efficacia, il processo di giudizio; l'insieme di tecniche includenti regole e criteri di classificazione, quali reti neurali, alberi di decisione, previsioni di sequenze temporali ed algoritmi genetici o strutturali di *clustering* e *similarity search*, viene altresì denominato *data mining*. Più in particolare:

- clustering e reti neurali non supervisionate concorrono al riconoscimento di gruppi omogenei che presentino regolarità al loro interno, così tendendo a catalogarli, ovvero a differenziarli dalla presenza di altri gruppi;

- reti neurali supervisionate ed alberi di decisione consentono operazioni di classificazione, secondo conoscenze acquisite in fase di addestramento, per catalogare e ripartire nuovi oggetti o prevedere eventi inediti;

- l'analisi delle associazioni assiste l'identificazione di regole per occorrenze concomitanti (due o più eventi) e interpretabili probabilisticamente.

Mentre il database aziendale risulta essere costantemente aggiornato, dovendo in ogni caso rappresentare l'istante corrente, il data warehouse memorizza solo ed esclusivamente determinati momenti delle attività di gestione, con aggregazioni riferite a particolari istanti di tempo (su scala settimanale, mensile, trimestrale, ecc.); è infine necessario integrare gli input che provengono dal database aziendale con informazioni relative all'ambiente esterno nel quale si opera, per cui, se da un lato si richiedono semplicità e leggerezza nel creare il DSS (maggiore flessibilità), oltre alla possibilità di aggiornare singoli elementi senza forzatamente dover lavorare sull'intero sistema, dall'altro nasce la necessità di dar vita a componenti di dialogo multiple, ovvero di segmentare la performance in ragione di eventuali o postume conflittualità e del brusco accodamento di ulteriori flussi entranti.

### 2.1.2 Tipologie di DSS: fasi e componenti di processo

La scienza delle decisioni è una dottrina interdisciplinare che studia modelli concettuali atti a fornire un supporto nell'identificare la decisione migliore (ottima), applicabile alla soluzione di problematiche in diversi campi (ambiente, economia, ingegneria, matematica, ecc.); le metodiche richiedono l'intervento di un decisore (*decision maker* o *project manager*) che, interagendo con l'analista, individua il provvedimento più congeniale (una o più soluzioni); in base al ruolo svolto da egli stesso all'interno dell'analisi, le tecniche risolutive si suddividono in quattro categorie principali:

- senza preferenze: il decisore non ha alcun ruolo e si considera soddisfatto l'aver trovato un qualunque ottimo;

- con preferenze a priori: il decisore specifica le sue preferenze ancor prima che abbia inizio il processo risolutivo, da cui la ricerca della soluzione ottima sulla base di quanto richiesto;

- con preferenze a posteriori: si genera in ogni caso l'insieme degli ottimi e lo si presenta al decisore che elegge l'opzione più confacente alle proprie esigenze;

- interattive: il decisore specifica le sue preferenze man mano che l'algoritmo procede, guidando egli stesso lo sviluppo in corso verso l'alternativa più apprezzabile e conveniente.

È opportuno precisare come l'analisi delle decisioni aiuti ad intendere la scelta preferibile, o appunto ottimale tra quelle possibili (ventaglio di strategie ammissibili), non garantendone tuttavia, "incontestabilmente", il miglior risultato; non è un caso che un DSS si riveli sempre perfezionabile in ogni sua componente. Nel contempo, ciascuna decisione risulta essere un atto conscio ed irrevocabile per l'allocazione di risorse, comunque sia indirizzata e finalizzata al raggiungimento di determinati scopi; i tecnici (analisti, ricercatori, ecc.), in base ad obiettivi e/o particolari esigenze da affrontare offrono consigli utili e concreti sul "come o cosa fare" per ottimizzare struttura dei DSS, tempistiche e modalità di intervento da parte del gestore, la cui figura potrebbe anche non coincidere con quella del decisore.

Sintetizzando, il tutto deve articolarsi in fasi separate e consequenziali, per le quali occorra anzitutto adempire alla definizione degli scopi primari e delle componenti atte al loro raggiungimento: metodi, regole decisionali, qualifiche o competenze e, da ultimo, incentivi per chi o coloro i quali operino con tempismo (*timing*), quando e se richiesto, nell'aprire posizioni o nel ricercare soluzioni inedite al momento appropriato nel pieno rispetto delle strategie perseguibili e dei vincoli imposti (un fattore determinante per tutelare la riuscita delle azioni indotte ed accrescere le probabilità di efficienza e profitto aziendale).

Il secondo elemento da tener presente risulta necessariamente costituito dall'insieme degli input di sistema; al dato di natura oggettiva, proveniente da misure dirette o indirette, si aggiungono solitamente informazioni di carattere soggettivo, derivanti da interviste, documenti ufficiali, osservazioni, oppure da stime e valutazioni esclusive da parte del management, cui affiancare metodi e modelli per la risoluzione:

- *Data Management Subsystem*: si compone del data warehouse, includente rilevanti informazioni per le decisioni da intraprendere, oltre al software per la gestione di quest'ultimo;

- *Model Management Subsystem*: è il pacchetto software per l'elaborazione dei dati e delle informazioni di cui al punto precedente (simulazioni); accanto alla realizzazione dei modelli derivanti da una prima e accurata analisi della struttura di sistema indagata, devono porsi a disposizione dell'utente strumenti per testarne la concreta validità a posteriori;

- *Dialog Management Subsystem*: è il sottosistema che gestisce la comunicazione tra utente e sistema (interfacce a sostegno del software, atte a garantirne funzionalità e semplicità d'uso).

Il terzo elemento viene infine rappresentato dalla successione cronologica che dal dato iniziale perviene all'output e, quindi, all'attento esame delle opzioni tra cui compiere scelte sensate, vantaggiose e lungimiranti (validità nel lungo periodo), cronologia che normalmente si compone dei seguenti momenti:

- *intelligence phase*: indagine della situazione reale, identificazione e definizione delle problematiche e del data warehouse (raccolta dati e classificazione, secondo le fasi di preprocessing e data mining);

- *design phase*: costruzione del modello che rappresenta il sistema, sua validazione ed individuazione di eventuali scenari, o stati di natura che si potranno verificare, tendendo a discostarsi da quello di partenza sul quale la decisione si troverà ad impattare;

- *choice phase*: selezione della decisione ottima rispetto al modello prescelto e adottato per l'analisi e conseguente verifica (*testing*), ove ciascun traguardo (*goal*) presenta l'effetto congiunto di una decisione e dell'avverarsi di uno stato di natura tra quelli eleggibili; alla luce di risultati non soddisfacenti, risulta lecito intervenire in maniera perfettiva sulle singole fasi del processo;

- *implementation*: realizzazione/attuazione del DSS, applicabile al caso reale, potendo sempre dedurre, enumerare e confrontare reazioni e ripercussioni generate dalla presenza dello strumento di supporto (perdite o benefici indotti); date due alternative, bisogna in ogni caso poter asserire: “*A* meglio di *B* ( $A > B$ ); *B* meglio di *A* ( $B > A$ ); *A* e *B* risultano indifferenti ( $A \sim B$ )”.

Logica, efficacia e cronologia delle riflessioni e dei ragionamenti orientano la qualità della gestione verso un più pronto e rigoroso controllo delle regole, così come delle cause e degli esiti producibili in ragione di una data azione.

La stessa nozione di “simulazione” potrebbe brevemente raffigurarsi nell’imitazione di un processo o di un sistema reale, al punto da consentire la creazione di una “storia artificiale”, operando particolari influenze su tale apparato; consiste quindi nel codificare un modello matematico in un software da impiegare per gestire ed elaborare dati misurati. Le uscite prodotte vengono comparate alle informazioni rilevate dal mondo reale verificando la bontà delle previsioni; effettuato tale controllo, il DSS è finalmente pronto per essere impegnato in analisi specifiche, ipotizzando/ammettendo una serie di variazioni ambientali e configurazioni sistemiche che conducano al raggiungimento di risposte distinte (scenari di gestione).

## **2.2 DSS in irrigazione: pregi e vantaggi per un approccio di lungo periodo**

La diagnosi delle incertezze o delle imperfezioni alla base di un processo decisionale risulta di fondamentale ausilio per qualsiasi tipologia di intervento, anche in ambito irriguo; ad avvalorare ulteriormente questa teoria concorre l’analisi dei trend di bilancio tra impieghi e disponibilità di risorse idriche, prospettando la necessità di sviluppare e approntare strumenti tecnologici e normativi indirizzati alla sostenibilità ambientale; un simile “modus operandi” impone maggiore dinamicità e vivacità riguardo alle scelte ammissibili/confrontabili, ancora in chiave di efficienza per prefissati scopi o utilizzi, rivelandosi atto a concepire “set di prove” inedite a sostegno di una medesima decisione.

In generale, così come in ambito agrario, si possono distinguere due categorie principali di giudizio di un DSS, fondate rispettivamente sul livello di efficacia e di efficienza, quale espressione del grado di conformità del sistema ai fini per i quali è stato progettato e reale esplicazione delle interrelazioni tra informazioni ricevute e prodotte; possono rispettivamente osservarsi concretezza e convenienza dell’azione svolta (è quella giusta?) e qualità con cui una stessa azione si compie (viene attuata nel modo migliore?) tramite quantitativi di risorse allocate, tempi di realizzazione e reazione del complesso distributivo alle richieste dell’utenza, inerenti soltanto ad alcuni degli indicatori di efficienza possibili.

Nel caso specifico dell’irrigazione, il dato potrebbe investire la valutazione del fabbisogno irriguo delle colture a mezzo di bilanci idrici informatizzati, mentre la soluzione (prodotto in fase decisionale) essere in primo luogo costituita dai tempi e dalle stesse modalità di ripartizione dei fabbisogni, fornendo criteri di supporto e priorità specifiche di adattamento in relazione al peso e all’importanza socio-economica di talune produzioni a dispetto di altre in determinati mo-

menti temporali, pur non necessariamente all'interno di un solo ciclo fenologico e/o di un'unica campagna irrigatoria (valenza pluriennale delle aree poste a coltura).

A tal proposito, un aspetto positivo è stato generato nell'ultimo ventennio dalla presenza e dall'incremento di ricerche mirate a definire leggi quantitative interagenti col livello di apprendimento e con le vaste possibilità di trattamento e rielaborazione dei sistemi biologici; per quanto dettagliata e puntuale, la sola esperienza in campo non porterebbe comunque sia ad eguagliare le numerose opportunità e potenzialità di impiego offerte dai modelli di simulazione idrologica, altresì applicabili in "condizioni limite" per singole variabili considerate. Oltre che scarsamente attuabile, l'analisi sul complesso reale potrebbe peraltro rivelarsi estremamente sconveniente e costosa; risulta quindi ancor più necessario sviluppare un prototipo fisico-matematico che ne inglobi interamente gli attributi, tendendo a riprodurlo (riferimento alla realtà). Ai fini migliorativi, da tale scenario possono poi parallelamente e/o diversamente spiegarsi e raccomandarsi nuovi ambienti esplorativi, per condizioni e posizioni più o meno contrastanti ed in parte distanti da quella iniziale. Si elencano sinteticamente pregi e vantaggi di un simile orientamento procedurale:

- velocizza la risoluzione delle problematiche (*problem solving*);
- automatizza i processi gestionali, accrescendone il controllo organizzativo;
- svela nuovi approcci nel pensare al problema nel tempo e nello spazio;
- incoraggia l'esplorazione e la scoperta da parte del decisore;
- migliora l'efficienza del personale, promuovendone l'apprendimento o la formazione;
- facilita la comunicazione interpersonale, semplificandone i rapporti;
- consente di dar luogo a maggior competitività, originando vantaggi sulla concorrenza.

Al tempo stesso, per garantire un servizio irriguo sempre all'altezza delle aspettative fissate o prestabilite, occorre porre rimedio anche alle negatività che il medesimo approccio può offrire; la struttura di un problema decisionale potrebbe periodicamente progredire o, in altri casi, perfino mutare, divenendo labile al crescere:

- del grado di incertezza al riguardo degli elementi da cui dipende la decisione migliore; tale incertezza si definisce completa allorquando il decisore non possiede elementi o informazioni sugli stati di natura che si verificheranno;

- della presenza di stati di natura determinati da altri decisori (*game*), ossia della complessità del livello di aggregazione del sistema e delle difformità di giudizio sulla stessa situazione da parte di più soggetti;

- della possibile variabilità dell'orizzonte temporale e del rischio: il decisore stima con quale probabilità potranno verificarsi gli stati di natura, stime che talvolta potrebbero rivelarsi errate, azionando impedimenti o difficoltà, quanto nel breve termine che a distanza.

Nel lungo periodo, solo chi crea un'organizzazione adatta, ad effetto di una corretta combinazione di norme, compiti e responsabilità, ottiene il successo desiderato; l'unica via per eccellere risulta quella di disporre e strutturare in maniera sistematica i molteplici fattori/aspetti interlocutori nello studio; solo così operando potranno evincersi significato ed importanza dell'impiego del DSS.

Naturalmente, per effetto del presente lavoro, ci si propone di restringere il campo investigativo al tema dell'irrigazione e, più in particolare, dei sistemi di supporto alle decisioni rispondenti al modello gerarchico di "rete in pressione con esercizio alla domanda".

### **2.3 Algoritmi di ottimizzazione multicriteriale**

Sono diverse le procedure di supporto al processo decisionale di gestione proposte in letteratura, gran parte di queste basate su tecniche di "ottimizzazione multicriteriale" (Bogardi et al., 1994). Mentre i modelli di simulazione rispondono esclusivamente al quesito "cosa accade se...", riguardando gli effetti producibili da un dato tipo e numero di eventualità sul sistema indagato, le tecniche di ottimizzazione consentono di approntare le migliori strategie di allocazione in riferimento ad uno o più criteri di condotta (ad esempio, accertare intervalli e canoni di erogazione da un serbatoio tali da massimizzare il beneficio socio-economico corrisposto alla comunità irrigante dal momento dell'entrata in esercizio).

Rare volte sussiste un'unica strategia capace di ottimizzare simultaneamente differenti funzioni obiettivo, spesso in contrasto tra loro, ma un approccio così implementato tiene conto delle singole finalità proposte (nessuna esclusa) ricercando un vettore di soluzioni, in tal caso erogative, atte all'individuazione del "valore ottimo".

Tali metodologie mostrano le loro potenzialità nel definire l'allocazione ottimale per bacini ad usi idrici conflittuali e risorse limitate (Ilich, 1993; Burton, 1994; Hannan e Coals, 1995), sistemi integrati ove le stesse vengano utilizzate sia per fini irrigui che per scopi civili o industriali. A valle del processo di indagine e classificazione delle strategie per l'attribuzione delle risorse in criteri predefiniti e di fianco all'adozione di modelli specifici per la risoluzione possono sempre includersi indicatori o variabili per la sintesi dei risultati ottenuti (Kularathna, 1992).

Per un tipico esercizio alla domanda, la distribuzione spazio-temporale dei singoli prelievi in rete dipende da due componenti, la prima delle quali risulta essere deterministicamente legata

all'insieme e all'evoluzione dei processi fisici che regolano l'operato del sistema; quanto alla seconda componente, invece, essa traspare interamente per via stocastica, derivando dalle modalità di distribuzione irrigua assunte da ciascun agricoltore.

### **2.3.1 L'orientamento stocastico della teoria delle code**

Più in generale, un modello stocastico si costituisce di un insieme finito di variabili casuali, dipendenti dal parametro  $t$ , con cui si suole di norma indicare il tempo, e dai valori che le singole variabili avranno assunto in passato in riferimento ad una base statistica di partenza (spazio probabilistico dei valori che potrebbero assumere all'attualità); ricostruire la distribuzione di probabilità delle singole variabili casuali (inizializzazione) porta poi a simulare, attraverso il modello, la variazione temporale di tali distribuzioni. Per un caso specifico, ci si potrebbe riferire alla probabilità media di funzionamento di una singola presa in rete (nodo generico) oppure, similmente, a quella media di non funzionamento, note a priori che siano: durata di esercizio in ore nell'arco giornaliero (per l'interno impianto), la portata addotta per ettaro, le tempistiche medie di impiego per ciascuna presa, ecc.

Il modello probabilistico di Clement (1966) viene tuttora ampiamente utilizzato per stimare il picco di flusso nelle condotte irrigue; la richiesta idrica per unità di area e il coefficiente di impiego per la determinazione del grado di flessibilità di una tubazione, di norma predefiniti, sono parametri da valutarsi attentamente per una maggiore veridicità delle simulazioni. Attraverso tali assunzioni, l'influenza di un singolo nodo della rete risulta proporzionale alla corrispondente superficie irrigata, mentre il numero di idranti simultaneamente operanti può di fatto modellarsi ad opera di una distribuzione normale, correlando la portata designata al generico livello di probabilità, pur non tenendo conto delle tipologie colturali.

Con approccio analogo, differenti metodologie sono state seguitamente sviluppate e proposte (Abdellaoui, 1986; Ait Kadi et al., 1990); in questi casi, al numero di nodi andrebbero a sostituirsi le caratteristiche fisiche di ciascuna azienda servita, l'estensione delle stesse aziende, le tipologie di suolo e raccolto, oltre all'efficienza irrigua, tutte intese come variabili stocastiche del modello. Il numero di campi destinati all'irriguo e l'ammontare complessivo di risorsa disponibile appaiono nuovamente da determinarsi a priori; in tal senso, la teoria delle code riprodurrebbe la variabilità di portata giornaliera per qualsivoglia nodo, anche ad effetto del bilancio idrologico per ogni tipologia di terreno e/o colture, sebbene la distribuzione spaziale si riveli ancora stimata stocasticamente.

Trattasi in ogni caso di una modellistica decisamente complessa a livello computazionale e tuttora scarsamente applicabile in casi reali, la cui intricata natura viene posta in rilievo dalla ri-

dotta scala di analisi (ad intervalli di tempo subgiornalieri); il modello stocastico, inoltre, si limiterebbe alla sola evoluzione temporale delle variabili casuali selezionate in corso di indagine, da cui nuovi spazi probabilistici di valore per le stesse.

### **2.3.2 L'approccio deterministico**

Abbinando alle nuove tecnologie una più profonda comprensione dei processi fisici implicati nell'osservazione di un sistema alla domanda, si rivela tuttavia possibile sopperire alla componente stocastica usufruendo di approcci interamente meccanicistici; attenendo all'esame pratico sul funzionamento di un apparato che consideri intervalli temporali giornalieri per la valutazione dei prelievi in rete, il fattore deterministico viene sempre a prevalere (se non totalmente ad imporsi) su quello aleatorio.

Il modello deterministico "tenta" di prevedere l'evoluzione spazio-temporale del complesso investigato, attraverso la soluzione numerica (non analitica) e approssimata dell'insieme di relazioni matematiche descrittive leggi fisiche che globalmente lo governano. Per ottenere questo risultato è necessaria la conoscenza dello stato di partenza (condizioni iniziali), mediante le quali si rivela possibile fornire i valori di inizializzazione delle variabili indipendenti del complesso di equazioni di cui si compone il prototipo; ultimata la procedura di inizializzazione, il modello può avviarsi ed evolvere verso la soluzione.

Ne deriva un risultato "unico", oltre che numerico, per ciascun punto dello spazio ed istante temporale presente e/o futuro, più esplicitamente mirando alla definizione, alla conoscenza e alla cura dei seguenti aspetti:

- volume irriguo specifico fisso o variabile, in funzione del contenuto idrico nel suolo;
- volume massimo giornaliero a disposizione dell'intero sistema;
- valore minimo dell'altezza piezometrica alla consegna.

## **2.4 La scala spaziale di applicazione**

Le distinte tematiche da approcciare dipendono inevitabilmente dalla realtà presa in considerazione, da riferirsi anzitutto all'estensione dell'area di indagine; la particolare scala applicativa influenza notevolmente il tipo dell'analisi, così come la stessa composizione e le caratteristiche del DSS proposto per la soluzione di problematiche specifiche; riferimento ed attuazione del metodo alle diverse scale portano a variare gli stessi obiettivi o finalità per le quali risulta essere elaborato e adottato:

- planetaria o continentale: cambiamenti climatici, computo delle risorse disponibili, deterioramento del suolo e desertificazione;
- nazionale o regionale: valutazione del rischio di inondazioni e/o siccità e di risorse potenzialmente impiegabili per usi agroambientali, conservazione della biodiversità, sensibilizzazione al pubblico e produzioni in sicurezza per gli alimenti;
- di bacino idrografico: pianificazione e allocazione delle risorse (idriche e non);
- comprensoriale: esigenze e propositi delle singole aziende alla scala locale, qualità e convenienza delle scelte in contrasto/relazione a norme e risorse effettivamente adoperabili;
- aziendale (siti specifici): massimizzazione del profitto/produktività delle colture in funzione di condizioni pedo-climatiche differenti e particolari fabbisogni idrici da ottemperare.

Mentre alla scala aziendale o finanche di singolo appezzamento (parcella irrigua) risulta lecito intendere ottimizzare l'uso della risorsa idrica mediante la stesura di bilanci idrici, anche informatizzati (Raes et al., 2006) o con l'ausilio di misure dirette di umidità e potenziale nel suolo, a quella comprensoriale, come su scala regionale o di bacino idrografico, la medesima tecnologia appare difficilmente applicabile, considerata la carenza di alcune informazioni necessarie, tra cui aspetti relativi all'utilizzo del suolo ed alla gestione delle colture; si rivela ancor più indispensabile ricorrere a strumenti informativi esterni atti a sopperire a tali mancanze, per l'appunto basati sull'integrazione tra cartografie pedologiche e dati meteorologici in tempo reale, oggigiorno ampiamente diffusi e comodamente reperibili, oppure identificabili nel telerilevamento (per stime di biomassa e di area fogliare, coefficienti legati al particolare sviluppo fenologico colturale, indicazioni sulle tipologie presenti in un dato momento temporale, ecc.).

A livello di bacino idrografico, molte delle tematiche gestionali traslano per lo più verso la pianificazione e l'allocazione di risorse idriche su ampia scala; potrebbe sussistere un problema di priorità, ossia di ripartizione dell'acqua alla fonte (più a monte) tra diversi impianti e/o utenze (civili, industriali, irrigue); in tal caso, il sistema nella sua interezza e complessità viene a scomporsi in subsistemi di carattere profondamente diversificato, per tipologia amministrativa, requisiti legati alla stessa posizione geografica o alla stessa geomorfologia del territorio, rilevanza politica, socio-economica ed ambientale di ognuno; detti subsistemi riproducono utenze a sé stanti, in contrasto a richieste più o meno variabili, al vaglio di quesiti e considerazioni di inclinazione logistica, a seconda di obiettivi e/o intenti generali e mirate garanzie di conquista di un aumento di efficienza irrigua di insieme, che, come anticipato, risulta essere il primo indicatore di perdita o dispersione idrica.

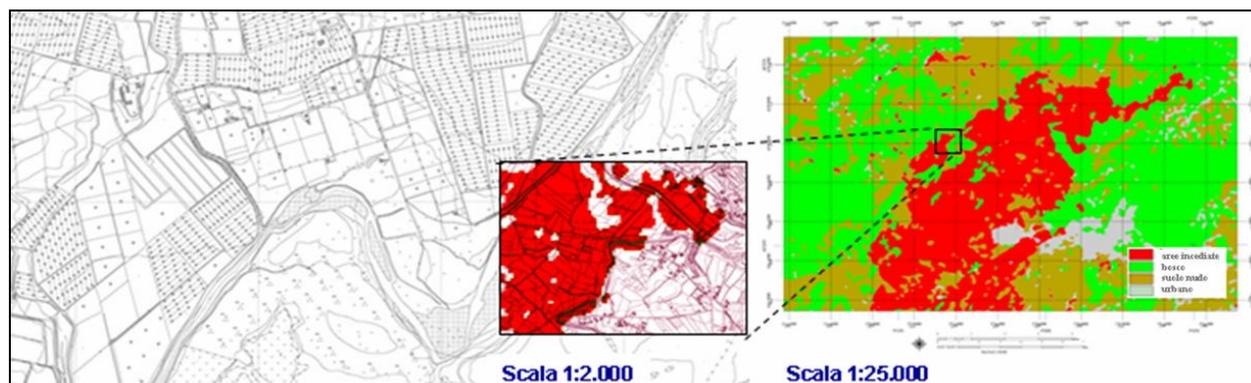


Fig. 2.1 - Particolare restrizione del campo di indagine dalla scala regionale a quella locale.

## 2.5 Breve rassegna sulle tipologie esistenti

A causa delle diversità legate al concetto e al significato di scala poc' anzi esposto, sarebbe scarsamente consigliabile approdare al caso di interesse omettendo l'osservazione e/o il riesame, oltre che per il DSS SIMODIS ivi adottato, di criteri e contingenze più o meno analoghe presenti nei casi in letteratura; un approccio corretto e ragionato impone senz'altro di prenderne visione, fornendone, almeno per alcuni di essi, un'immagine descrittiva e sintetica.

### 2.5.1 Struttura di un sistema decisionale di supporto alla scala comprensoriale

Dalla piccola-media scala locale e comprensoriale a quella globale, esistono distinti livelli o categorie di DSS; nei riguardi del primo gruppo di appartenenza, la funzione di supporto decisionale in campo irriguo può concisamente articolarsi nelle seguenti fasi:

- creazione di un database di input: Sistema Informativo Geografico in cui confluiscono informazioni di base relative alla topografia catastale, ai suoli, alle colture ed alla rete irrigua di distribuzione, dati di input/output della procedura, in formato raster e/o vettoriale a più livelli;
- realizzazione di una mappa delle caratteristiche idrauliche dei suoli accanto alla stima dei parametri delle curve di ritenzione e di conducibilità per i diversi orizzonti di terreno;
- acquisizione ed analisi di immagini telerilevate, con ausilio di informazioni di pieno campo e dei parametri agrometeorologici di base per la produzione di mappe specificamente inerenti l'evapotraspirazione potenziale delle colture presenti;
- applicazione del modello di simulazione idrologica per il calcolo dei fabbisogni netti delle colture e dei tempi di intervento; l'obbligo di pervenire a risposte adeguate al quesito di difformità tra domanda ed offerta, con la prima rappresentata dalla variabilità spazio-temporale della richiesta dei coltivatori, si colloca sempre tra i fini primari del modello gestionale;

- generazione della distribuzione delle portate in rete per differenti scenari, che consentano di accrescere la stessa utilità dell'analisi (secondo un maggior numero di alternative confrontabili e di informazioni da processare), compatibilmente con la disponibilità di risorsa idrica (capacità di sistema), ottenuta al punto precedente;

- verifica di funzionamento idraulico della rete: noti i prelievi nei singoli nodi, risulta possibile effettuare un confronto tra richiesta erogativa e disponibilità in rete, da cui nuove capacità di trasporto idraulico, più o meno idonee nei riguardi di ciascun scenario; in caso di inidoneità si rende doverosa la ricerca di inedite assegnazioni di portata, necessariamente rapportabili alla capacità disposta.

### **2.5.2 Introduzione al SIMODIS: *SIM*ulation of *On-Demand Irrigation Systems***

Le tecniche ed i modelli descritti sono stati impiegati per lo sviluppo del SIMODIS, presso il Dipartimento di Ingegneria Agraria ed Agronomia del Territorio dell'Università di Napoli Federico II, ideato, calibrato e da ultimo volto al servizio dell'area del comprensorio "Gromola" del Consorzio di Bonifica Paestum Sinistra Sele (Salerno), dove da anni è presente un'agricoltura di tipo industriale, con prevalenza di colture ortive, foraggere e di alberi da frutto; praticata da aprile in ottobre su circa 3.000 ha, l'irrigazione risulta ampiamente assicurata da una rete distributiva in pressione, che, dal 1993, ha gradualmente sostituito le canalizzazioni a superficie libera per lo più risalenti agli anni '50.

Il DSS è stato realizzato digitalizzando i confini delle parcelle irrigue sulla base di planimetrie catastali ed aerofotogrammetrie 1 : 10.000 (in coordinate UTM, quale unico riferimento geografico che consente la sovrapposizione di mappe di origine distinta).

Si è richiesta la conoscenza in ingresso di numerose informazioni, quali evapotraspirazione di riferimento e precipitazioni giornaliere, limiti geografici delle parcelle indagate ed indicazioni nel merito delle colture presenti, parametri colturali e relativa evoluzione temporale, caratteristiche idrauliche dei suoli con adozione di metodi indiretti e forme di interazione con la circolazione sotterranea, oltre alla geometria e alla stessa natura della rete anzidetta (caratteristiche idrauliche ad essa associate).

Nella definizione del complesso di dati caratterizzante il sistema irriguo in esame, è risultato di fondamentale importanza tener conto della variabilità/instabilità spazio-temporale delle variabili e dei parametri fin qui menzionati; la capacità del DSS SIMODIS di riprodurre accuratamente l'attività organica, in maniera deterministica, sarà dipesa in larga parte dall'affidabilità dei dati di input e da quelli specificatamente relativi alla variabilità di suoli e colture. In questa direzione avrà assunto particolare rilievo l'impiego di tecniche di telerilevamento multispettrale per

monitorare il singolare sviluppo fenologico delle piante e stimare i fabbisogni irrigui, quale complemento necessario all'utilizzo di qualsiasi forma di DSS in tale ambito (D'Urso et al., 1999).

SIMODIS, grazie al suo formato digitale, agevola lo scambio di informazioni con gli utenti, permettendo la diretta introduzione in ambiente GIS delle varie analisi; interfacciando i differenti moduli con gli strumenti di simulazione/rilevazione impiegati, approda alla sintetica descrizione di scenari di gestione alternativa, all'interno dei quali ciascuna parcella potrà sempre identificarsi attraverso un codice specifico che la associ ad un nodo della rete di appartenenza; risulta dunque immediato ottenere la portata richiesta nel generico nodo sulla base dei fabbisogni irrigui delle altre unità corrispondenti.

Il SIMODIS è stato calibrato in riferimento alla stagione irrigua 1994, per la quale risultassero disponibili le serie storiche dei volumi giornalieri rilevati in corrispondenza di alcuni reparti, ricoprenti un'estensione media di circa 250 ha; entità dei prelievi e relative evoluzioni temporali si sono mostrate prossime alle osservazioni, a conferma delle ipotesi assunte nel merito delle simulazioni effettuate.

La fase di simulazione ha riguardato l'analisi di distinti scenari in condizioni carenza idrica e la stima dei rispettivi "volumi minimi di intervento", allo scopo di non compromettere le singole produzioni e conseguire pregevoli e consistenti risparmi sui consumi irrigui stagionale, fino al 25% per l'intero comprensorio (D'Urso e Santini, 2002).

Il valore del parametro  $i_r$  associato al livello di deficit idrico rispetto alla saturazione è stato individuato minimizzando lo scarto fra misure di prelievo effettivo e valori simulati alla scala di distretto, ritenuto pari a 0,5 (per cui invariato in corso di indagine); è stato inoltre possibile fissare rispettivamente pari a 71.000 m<sup>3</sup> il volume di riserva idrica disponibile (massima giornaliera) ed a 30 m il valore del carico piezometrico minimo alla consegna, conformemente ai rilevamenti compiuti presso alcuni contatori aziendali.

La simulazione del funzionamento idraulico della rete è stata invece effettuata considerando la stagione irrigua 2000, per la quale fossero state effettuate ulteriori letture presso i contatori di reparto, ritenendo validi i valori dei tre parametri globali del sistema irriguo  $i_r$ ,  $V_{RES}$  e  $H_{min}$  determinati in precedente fase di calibrazione; agli scopi del monitoraggio dello sviluppo colturale effettivo sono state utilizzate tre immagini Landsat acquisite nel corso della stagione irrigua.

Il volume irriguo cumulato tra luglio e settembre 2000 rilevato presso i contatori di reparto è risultato di 3.548.000 m<sup>3</sup>, mentre quello simulato di 3.944.000 m<sup>3</sup> (+ 11%); inoltre, analizzando l'andamento degli stessi volumi, rispettivamente alla scala di distretto e dei singoli reparti (unità primarie), la differente aggregazione spaziale non è apparsa sostanzialmente influenzare o alterare l'accordo fra misure e simulazioni, con uno scarto medio del 25%.

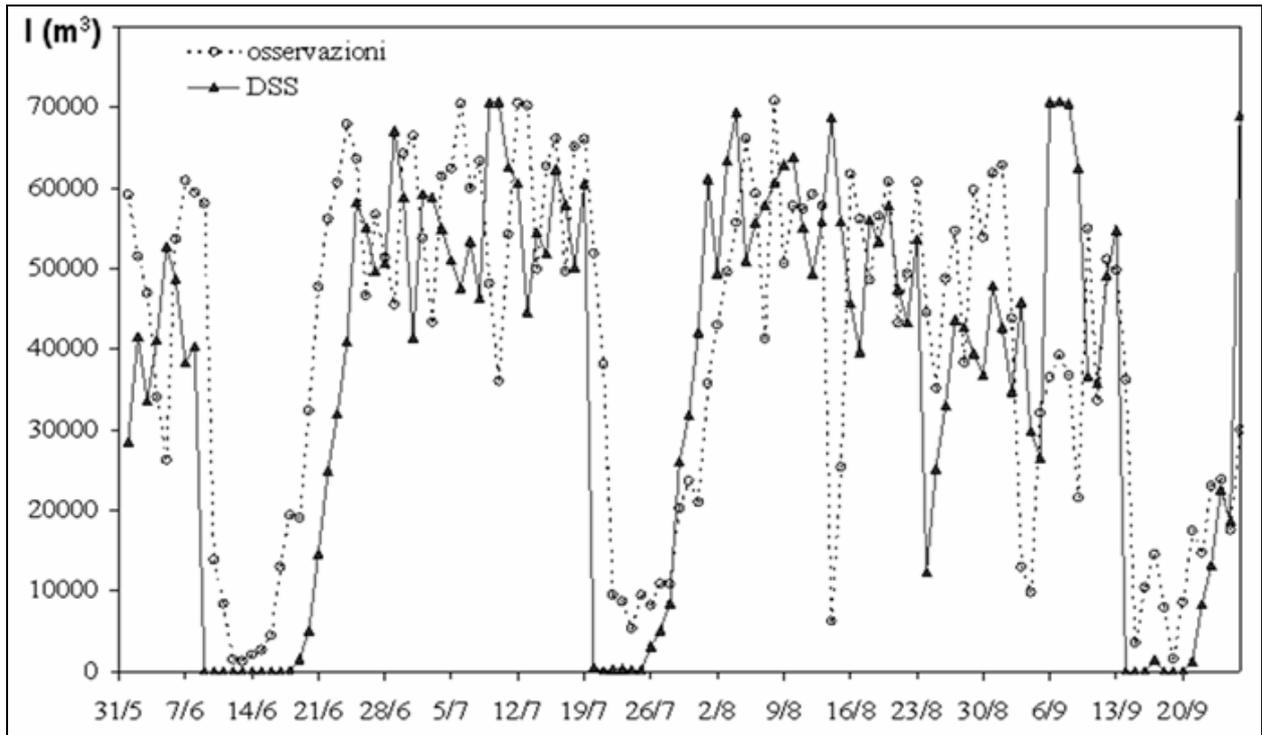


Fig. 2.2 - Comparazione tra prelievi giornalieri simulati dal SIMODIS e misurati presso i contatori volumetrici di reparto nel comprensorio Gromola di Paestum (1994).

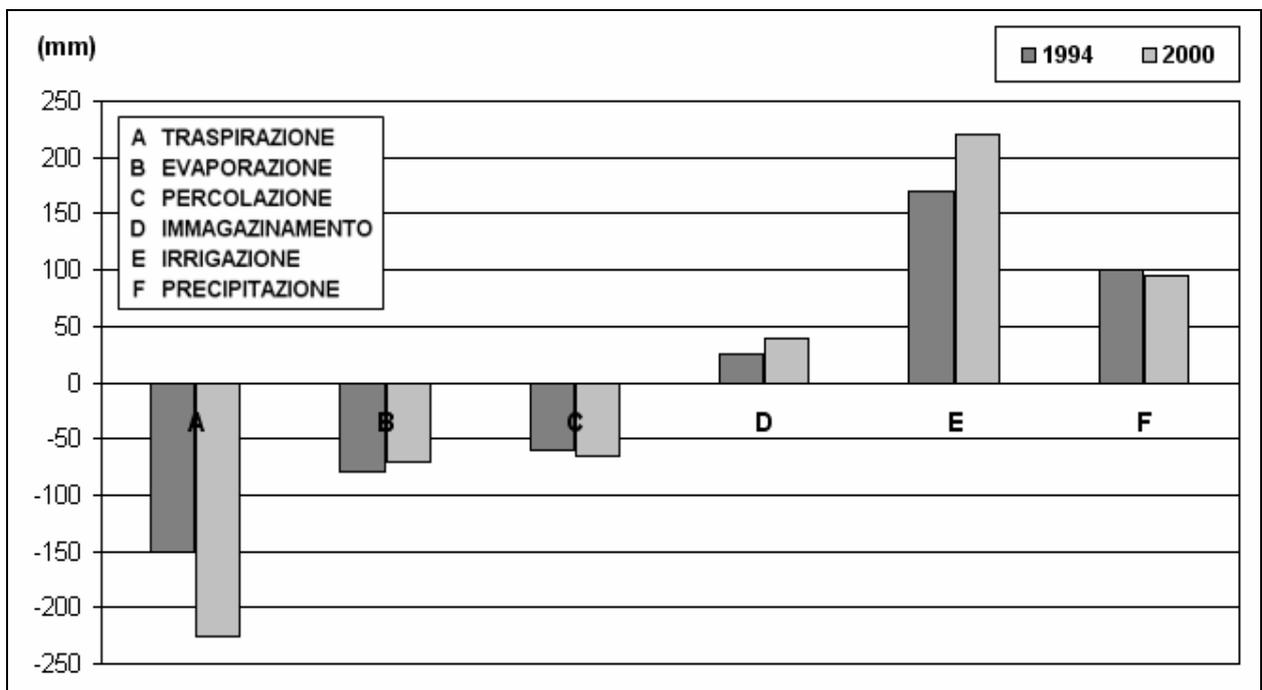


Fig. 2.3 - Raffronto, in termini cumulati da giugno a settembre, tra i diversi termini di bilancio idrologico, nel distretto irriguo di Gromola, per annate di calibrazione (1994) e validazione (2000).

Il grafico a barre, invece, illustra il parallelismo tra i diversi termini del bilancio idrologico per il distretto Gromola, in entrambe le stagioni di riferimento, ove, oltre alla sostanziale coincidenza degli apporti pluviometrici, può notarsi un consistente incremento del volume irriguo (pari

al 30%), cui corrisponde una maggiore traspirazione (+ 40%); valutando l'efficienza globale del sistema di distribuzione in base al rapporto fra le due variabili, è infine possibile osservare un significativo aumento di efficienza irrigua, dal valore 0,91 (stagione 1994) a quello all'incirca unitario di 0,98 (stagione 2000).

Sempre a tal proposito, è stato possibile ricavare un indice di particolare interesse, espresso dall'incremento evapotraspirativo (vi corrisponde un aumento di produzione) in presenza di irrigazione rispetto all'assenza della stessa.

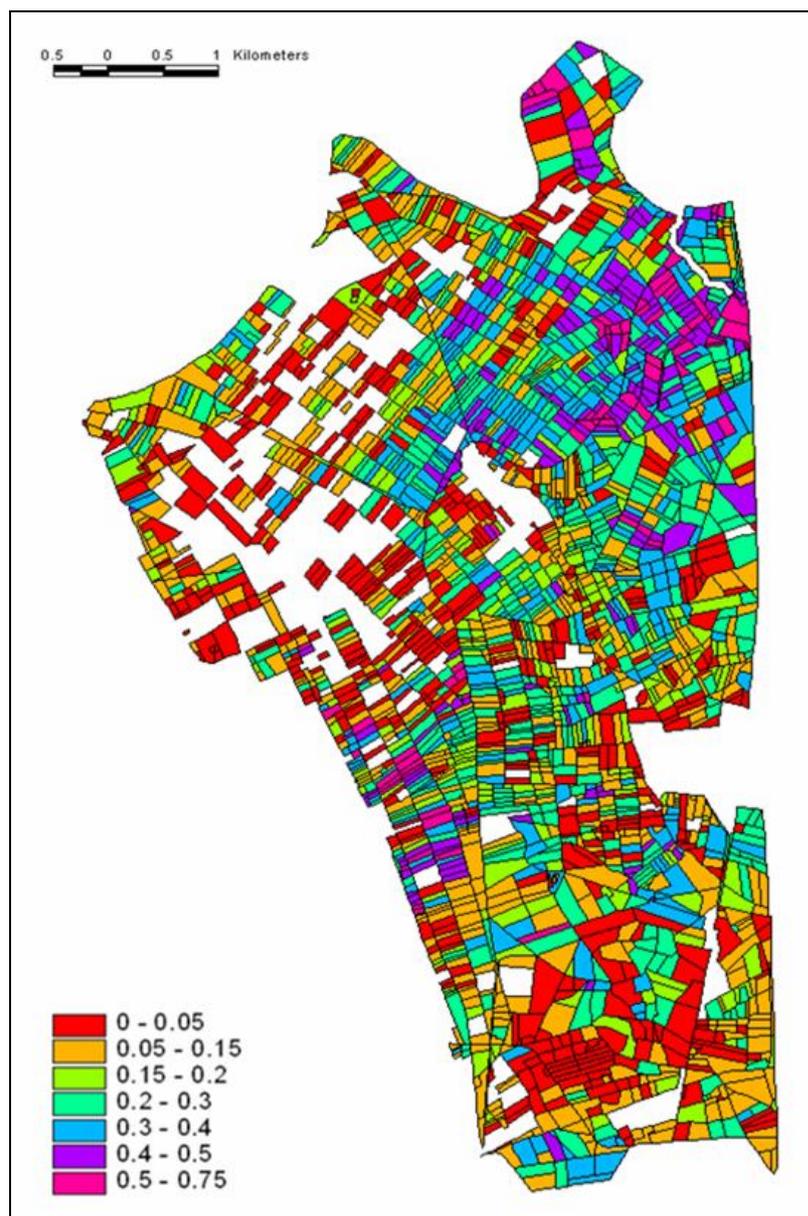


Fig. 2.4 - Valori dell'indice di performance irrigua per scenario di riferimento (giugno-settembre, 1994).

È stata dunque confermata l'ipotesi secondo la quale un tale sistema potesse descriversi per via deterministica, con sufficiente accuratezza, ai fini pratici di una gestione efficiente, mirando a definire uno strumento di supporto che potesse ottemperare alla descrizione della disponibilità

di risorse idriche, in relazione alla capacità strutturale del complesso distributivo, così da colmare discrepanze esistenti tra stessa disponibilità e quantitativo d'acqua effettivamente presente nel suolo (carenza idrica); di contro, pur avendo adottato affinate procedure per meglio caratterizzare la variabilità dei suoli e delle colture, è altresì parso evidente come la completa azione svolta dal sistema indagato non potesse puramente spiegarsi in termini meccanicistici.

Il comportamento degli agricoltori permane difatti il maggior responsabile della componente stocastica (decisamente influente dal momento che vengano analizzati ristretti livelli di aggregazione spazio-tempo), particolarmente critica ai fini dell'esatta individuazione del parametro  $i_r$ .

Nel merito della struttura procedurale del SIMODIS e delle relazioni specifiche ad esso associate si rimanda al seguente capitolo.

### **2.5.3 Il Progetto AQUATER: un approccio su media scala**

Le regioni meridionali risultano propriamente caratterizzate da un'elevata domanda evapotraspirativa e limitata disponibilità di acque irrigue di buona qualità; nel contempo, però, si rivelano anche potenzialmente in grado di sostenere attività agricole ad alto valore aggiunto.

Il Progetto triennale AQUATER 2005/2008, finanziato dal Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, nell'ambito del Programma di Sviluppo del Mezzogiorno, "Ricerca e Innovazione Tecnologica", ha inteso ampliare l'approccio integrato, rivolto all'ottimizzazione delle risorse idriche da parte delle autorità preposte alla pianificazione territoriale, in alcune aree del sud Italia, caratterizzate da sistemi irrigui ad alto valore aggiunto; ancora una volta, tutto ciò sarà avvenuto basandosi su tecniche innovative quali il telerilevamento satellitare e l'impiego dei modelli di simulazione (DSSAT, CropSyst, SWAP, EPIC, SALUS-TERRAE, STAMINA), oltre che sull'apporto dei Sistemi Informativi Geografici per la gestione di parametri di tipo distribuito riguardanti il clima, il suolo e le colture di un dato territorio, loro regionalizzazione e mappatura (Matthews, 2002; Basso, 2005).

Prima immediata conseguenza dell'indiscussa affidabilità degli strumenti prescelti (modelli su base fisica), si è rivelata l'elevata riproducibilità dei risultati, che avrà acconsentito alla forte apertura/generalizzazione delle metodologie studiate per aree con caratteristiche geomorfologiche differenti da quelle in cui si saranno effettuati i test, in particolare, per tre comprensori irrigui di notevole rilevanza agricola, a livello meridionale come su scala nazionale: quello della Capitanata (4.000 km<sup>2</sup>, di cui oltre 1.800 km<sup>2</sup> serviti da sistema di distribuzione in pressione), quello dell'arco Ionico-Metapontino (800 km<sup>2</sup>) e quello della Piana del Sele (500 km<sup>2</sup>).

La contemporanea azione sui tre bacini ha contribuito ad identificare distinti itinerari metodologici in funzione delle caratteristiche peculiari dei suddetti territori: il primo per lo più orien-

tato alle colture cerealicole e industriali, il secondo sia alle orticole che alle coltivazioni arboree, mentre il terzo, infine, maggiormente alle orticole.

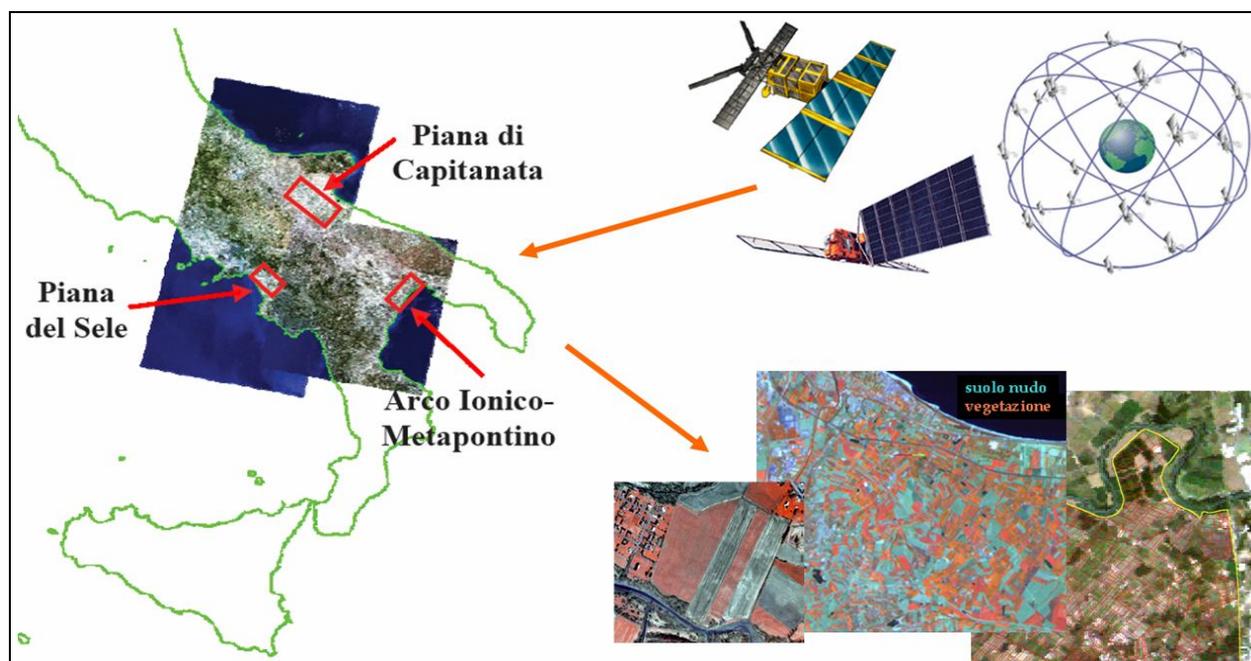


Fig. 2.5 - Impiego del telerilevamento satellitare per le aree di pertinenza del Progetto AQUATER.

L'obiettivo primario ha riguardato la descrizione delle aree investigate e la suddivisione in regioni vulnerabili o potenzialmente esposte a criticità, dal punto di vista dell'effettiva disponibilità idrica, in funzione delle colture, dei suoli, del clima e della salinità; tutto questo ha generato un chiaro e consistente impatto sull'efficacia della programmazione generale degli Enti proposti all'erogazione in campo e sulla pianificazione di interventi indirizzati ad accrescere e conservare la sostenibilità delle singole attività per i prossimi decenni.

Un secondo proposito ha invece considerato la possibilità di stimare settimanalmente i consumi idrici delle colture, finalità perseguita correggendo singoli bilanci idrologici all'interno dei modelli di simulazione impiegati direttamente tramite quanto ottenuto da satellite, sino a elaborare pronostici di produzione futura sulla base di indicatori di stress idrico. L'acquisizione satellitare ha riguardato parametri superficiali quali: albedo, temperatura superficiale, umidità del suolo, altezza e rugosità delle colture, frazione di copertura ed indici di vegetazione.

Dal 2006 sono state monitorate diverse aziende agricole che disponessero di appezzamenti omogenei, di estensione variabile, tra 6 e 20 ha (in prevalenza nel foggiano, coltivate a pomodoro, frumento duro e barbabietola; altre ancora nell'area costiera ionica, coltivate ad anguria; una soltanto nella Piana del Sele, coltivata a mais); in tutti i casi osservati sono stati effettuati rilievi di verità a terra (umidità del suolo, dinamiche di accrescimento, consumi idrici derivati), imprescindibilmente accompagnati dalla presenza di misure meteorologiche appropriate.

Ad esempio, nel caso specifico della Capitanata, il pacchetto DSSAT ha potuto impegnare diversi moduli atti alla simulazione delle colture diffuse nelle singole aree di interesse; l'opzione *spatial analysis* ha consentito di georiferire e successivamente riprodurre il sistema colturale nella sua interezza (Jones et al., 2003), per suoli e stazioni climatiche differenti.

Ciascuna simulazione ha riguardato ampie scale temporali e spaziali: 45 anni di serie storiche e 481 poligoni di suolo mediante interfaccia AEGIS/WIN, anch'essa inclusa in DSSAT.

La resa delle colture nei rispettivi scenari, di pomodoro (IRR30, IRR50, IRR70) e frumento duro (IRR10, IRR30, IRR50), basati sull'irrigazione automatica in corrispondenza di tre distinti valori della soglia d'acqua disponibile nei primi 30 cm di suolo, è risultata scarsamente influenzata dai rispettivi incrementi rispetto al caso completamente asciutto (l'innalzamento della soglia medesima avrebbe indotto ad impieghi altrettanto crescenti di volume stagionale), pur analizzando livelli di produzione commerciale e reddito netto (Rinaldi e Borneo, 2006).

Nel primo caso, si è individuato un livello di soglia adeguato come giusto compromesso tra aspetti di natura economica e prestazionale (50%), triplicando la produzione ed evidenziando significativi vantaggi apportati alla redditività da irriguo (+ 7800 €/ha) rispetto alla tesi in asciutto decisamente improponibile; le simulazioni del frumento, invece, avranno tutte ugualmente recato un incremento di produzione del 19%, differenza irrilevante rispetto al caso non irrigato (perfino il più conveniente in termini di reddito associato, se confrontato ai restanti scenari).

SCENARIO POMODORO	resa in bacche fresche (t/ha)	volume stagionale (mm)	interventi irrigui (n.)	reddito netto (€/ha)
asciutto	54,3 ± 39,3	-	-	- 2374 ± 2357
IRR30	187,1 ± 28,1	298 ± 76	6 ± 2	5214 ± 1685
IRR50	198,0 ± 25,9	342 ± 79	9 ± 2	5778 ± 1556
IRR70	197,4 ± 27,0	398 ± 76	15 ± 4	5597 ± 1621
SCENARIO FRUMENTO DURO	resa in granella (t/ha)	volume stagionale (mm)	interventi irrigui (n.)	reddito netto (€/ha)
asciutto	3,03 ± 1,30	-	-	105 ± 172
IRR10	3,57 ± 1,18	138 ± 72	2 ± 1	- 11 ± 172
IRR30	3,64 ± 1,18	183 ± 73	3 ± 1	- 94 ± 171
IRR50	3,62 ± 1,18	208 ± 71	5 ± 2	- 193 ± 188

Tab. 2.1 - Resa, volume di irrigazione e reddito netto (media ± deviazione standard) simulati nei 45 anni.

All'interno dell'AQUATER, si sono impegnati tutti gli strumenti in possesso delle diverse Unità Operative afferenti, oltre alle informazioni esibite dalle Amministrazioni vigenti sul territorio; il prodotto finale è risultato una piattaforma software operativa volta a fornire le uscite settimanali dei modelli selezionati, output riguardanti previsioni di consumi idrici e realizzazione di mappe di rischio per danni da eccesso e/o deficit idrico.

#### 2.5.4 Altre forme di supporto decisionale: un raffronto su vasta scala

La ricerca su ampia scala favorisce ed ammette ancor più l'impiego della tecnologia, vincolando ulteriormente la soluzione di quesiti di ordine gestionale all'adozione di pacchetti informatici integrati e sviluppati all'occorrenza (Wang e Hjelmfelt, 1998; Gallant, 1999; Hartkamp et al., 1999); la stessa numerosità delle aree di intervento, come degli obiettivi di volta in volta perseguibili, prevede che a ciascuna problematica siano di conseguenza da destinarsi moduli specifici.

Ne discende che in tale sede si intenda fornirne un sintetica riesamina, rendendone una sottile impronta al riguardo, al di là delle potenzialità in ambito agrario (gestione delle risorse idriche in senso assoluto); singole opzioni di intervento all'oggi presenti nei DSS su vasta scala possono difatti riguardare:

- l'espansione delle risorse idriche e modificazioni strutturali per lo più mirate ad aumentare la disponibilità al riguardo;
- i repentini mutamenti climatici che influenzano ed incidono sulla stessa disponibilità, non solo presente, ma soprattutto futura (indagini di medio-lungo periodo)
- la gestione dell'offerta, che, quando possibile, punta a limitare la richiesta (controllo);
- aspetti politici di natura istituzionale che regolano abitualmente le modificazioni dei prezzi dell'acqua al consumo (tariffazione del servizio idrico);

##### Caso 1

WSM DSS è un pacchetto di supporto decisionale per la definizione di strategie di gestione sostenibile, atto a quantificare e mitigare impatti ambientali ed economici nell'ottica e nel contesto di un approccio integrato.

Basato sul GIS e sviluppato dai partners del *Methodology Group*, internamente al Progetto Europeo *Water Strategy Man 2002/2005*, si presenta come un sistema completo per scelte in materia di pianificazione e allocazione delle acque e dei servizi idrici su media e grande scala; rivolto alle principali Agenzie/Enti responsabili della corretta gestione delle risorse, in accordo con la *Direttiva Europea 2000/60*, sostiene lo scambio di flussi e/o informazioni su domanda ed offerta, di fianco all'adozione di criteri multi-obiettivo.

Abile a schematizzare il sistema idrico di un'intera regione tramite una rete di nodi e collegamenti che rappresentano utenze esistenti (agricole, industriali, domestiche), risorse disponibili, sia naturali (fiumi, invasi, pozzi) che artificiali, apparati di trattamento (impianti di desalinizzazione e riutilizzo delle acque, impianti di trattamento delle acque reflue) e centrali idroelettriche, WSM DSS punta a soddisfare ciascuna richiesta in misura idonea e bilanciata.

La modellazione della rete permette di stimare la quantità d'acqua necessaria per soddisfare la domanda esistente e futura o, ancora, di determinare quali siano gli interventi più adatti da realizzare (realizzazione di nuovi impianti, ripristino di condotte in reti preesistenti, inserimento di invasi per operazioni di compenso localizzato, ecc.), attraverso l'agevole introduzione di componenti aggiuntive nel sistema, valutandone tempi e relativa incidenza in termini economici (costi e ricavi); e ancora, ci si potrebbe interrogare sul significato, sull'incidenza e sulla gravità di talune correzioni al riguardo, ad esempio, alla luce dell'impatto e della rilevanza di futuri cambiamenti climatici, potendo includere scenari di precipitazione e generazione dei deflussi superficiali.

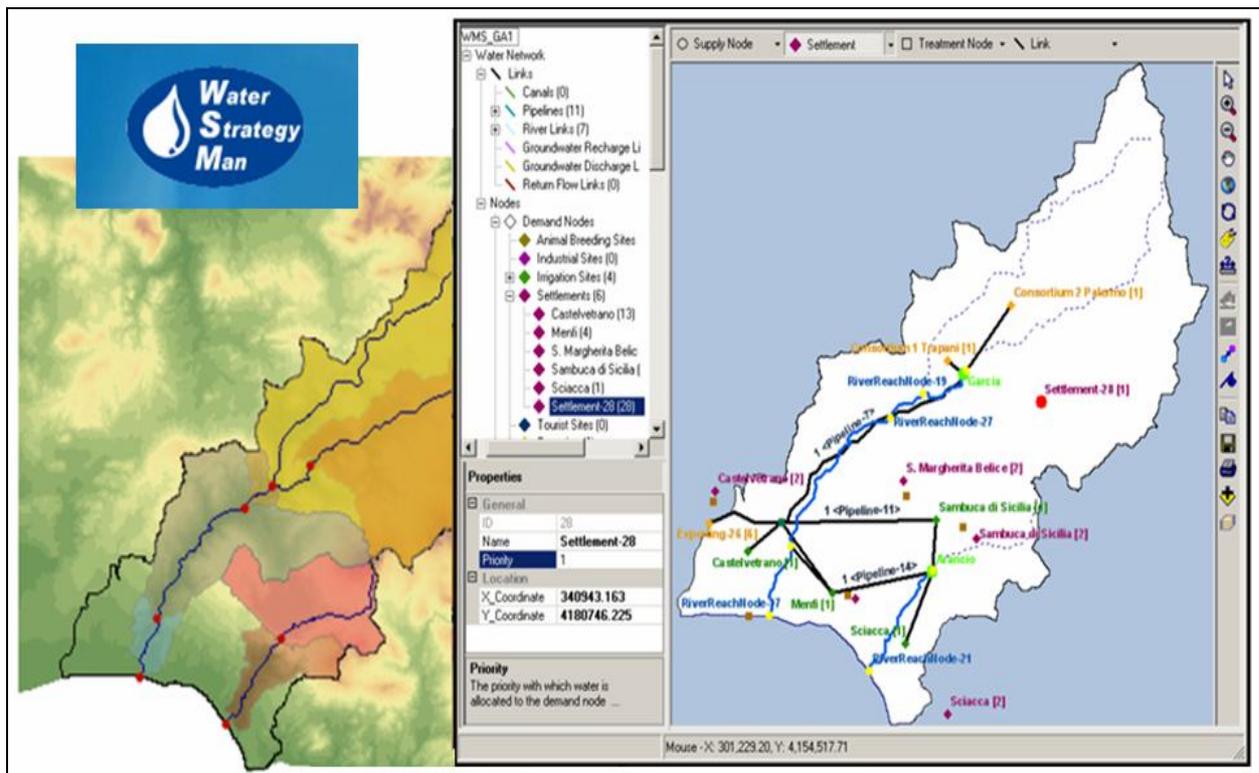


Fig. 2.6 - Definizione del sistema idrico mediante inserimento/collegamento delle diverse componenti.

Nel complesso delle simulazioni, la distribuzione delle risorse viene governata secondo un sistema di regole e di priorità, tenente conto, anche in questo caso, della molteplicità degli scenari proponibili, delle singole richieste idriche e dei volumi realmente erogabili: durante i periodi di carenza idrica, utenze a priorità elevata risulterebbero soddisfatte per prime e nel modo più completo possibile; l'opposto avverrebbe invece per servizi o utilizzi minori.

Più indicatori vengono calcolati e quindi mostrati in forma di grafico o tabella per ogni tipo di nodo o collegamento della rete idrica prestabilita; tra le macrocategorie di indicatori calcolati possono certamente elencarsi: indici di sfruttamento delle risorse, livelli e tipologie di dipendenza da risorse esterne, qualità dell'acqua, deficit, costi e ricavi del servizio idrico, volumi d'acqua specificamente allocati agli utenti ed indici demografici ad essi annessi.

L'apposita interfaccia GIS consente ancora una volta l'inserimento ovvero il collegamento delle diverse componenti di sistema, sicché le informazioni risultino memorizzabili e gestibili in un unico geo-database di riferimento. In sintesi, le strategie implementate includono:

- regole rivolte al miglioramento dell' approvvigionamento/rifornimento idrico, attraverso l'introduzione di strutture inedite, atte ad aumentare la disponibilità d'acqua (dighe, pozzi, desalinizzatori, ecc.);

- misure relative alla gestione della domanda, finalizzate alla sua limitazione/controllo (aliquote di fornitura idrica, ottimizzazione delle tecniche di irrigazione agricola, potenziamento delle infrastrutture per il contenimento delle perdite);

- elementi mirati al perfezionamento e/o alla modifica delle pratiche agricole alla scala regionale e politiche istituzionali (politica dei prezzi, incentivi, campagne educative).

Il modello di calcolo del WSM DSS si basa su tre componenti principali:

- Il *Water Availability Module*, dal preciso compito di valutare la quantità d'acqua disponibile nel sistema idrico che è possibile distribuire agli utenti; l'esame include previsioni sulla naturale ricarica ai corsi d'acqua ai laghi e alle falde;

- Il *Water Demand Module*, quale unico responsabile della generazione dei possibili scenari di domanda da parte delle utenze; risulta possibile valutare la crescita dei consumi domestici dovuta all'incremento di popolazione, stagionale o permanente, di valutare la richiesta agricola sulla base del tipo di colture e precipitazioni, ma anche di stimare la richiesta industriale e quella di produzione di energia elettrica;

- Il *Water Allocation Module*, "cuore analitico" dell'intero pacchetto, dalla finalità di simulare nello specifico la distribuzione d'acqua all'interno del sistema idrico sulla base delle informazioni precedentemente inserite (fornite dai primi due moduli).

WSM DSS permette dunque al gestore di definire strategie/politiche di intervento specifiche e di applicarle al caso studio (una alla volta o tutte insieme), giungendo finanche a riportare un'analisi economica del sistema di risorse, in termini di costi diretti o ambientali; accanto ai rispettivi indicatori di costo, restituisce ricavi relazionati alla vendita, percentuali di recupero delle spese sostenute e valore attualizzato dell'acqua.

Le stesse strategie vengono valutate per effetto di indicatori statistici (di affidabilità, vulnerabilità e resilienza), descrittivi l'andamento/comportamento temporale entro determinati range ( ritenuti più o meno soddisfacenti); la combinazione delle tre statistiche in un solo indice di so-

stenibilità restituisce il punteggio definitivo di ciascun piano gestionale, presentando un modello di classificazione secondo il quale strategie con punteggio più elevato potranno reputarsi migliori di altre (con votazione inferiore).

### **Caso 2**

Il software ProDam è un pacchetto di supporto decisionale per la regolazione in tempo reale di serbatoi naturali e/o artificiali, sia a scopo irriguo/idroelettrico che di protezione dalle piene; la ricerca del rilascio ottimale viene a basarsi sulla minimizzazione del valore atteso degli eventuali danni, mediante un modello *nearest neighbour* che combina previsioni di afflusso nel lungo periodo. Partendo dall'osservazione di precedenti afflussi al serbatoio, si ricercano situazioni che rispecchino il più possibile tendenze più recenti, secondo metrica prefissata; dalla composizione del campione risultante di serie passate, ne deriva un modello capace di estrapolare dati di previsione futura.

Sulla base degli afflussi previsti e della regola di gestione ottima ottenuta a priori, vengono calcolati i rilasci ottimali, poi filtrati, per verificarne l'attuabilità in funzione delle caratteristiche dei corpi di scarico, organi che potrebbero anche non essere predisposti a rilasciare una data portata; l'utente può intervenire manualmente sia sui rilasci che sugli afflussi, modificando di volta in volta il dato proposto; da ultimo, il software provvede a verificare la congruenza delle immmissioni proposte e a fornire l'andamento del livello di invaso, su scala tipicamente decadale o giornaliera (anche oraria, se esplicitamente richiesto).

### **Caso 3**

Rivolgendo parziale attenzione anche all'estero, un simile operato potrebbe esemplificativamente evidenziarsi/ritrovarsi a fronte dell'attuazione e del recente potenziamento di un sistema decisionale di supporto per la gestione dei sistemi agrari nel sud della Spagna, alla scala regionale andalusa, ai fini dell'incremento dell'efficienza irrigua della "Cuenca del Bajo Guadalquivir", di circa 78.000 ha, con preciso riferimento all'area Sevilla sud - Cadíz nord. L'adozione del DSS *Aquatool DMA*, sviluppato dall'Università di Valencia per l'analisi di bacini idrografici su ampia scala, ha consentito di definire una procedura che potesse tradurre particolari effetti di natura antropica (per azione delle stesse modalità di ripartizione delle risorse), in parametri atti a quantificare il grado di vulnerabilità delle opere idrauliche, ottimizzandone le prestazioni e, con esse, le caratteristiche dell'intero sistema di collegamenti; di qui, se e quando possibile, seguono il recupero e la riabilitazione di talune strutture preesistenti, oppure, in diversi casi, l'accorta definizione di criteri progettuali inediti, tesi alla realizzazione di bacini artificiali (primari o secondari) di raccolta e compenso (funzione di riserva idrica).

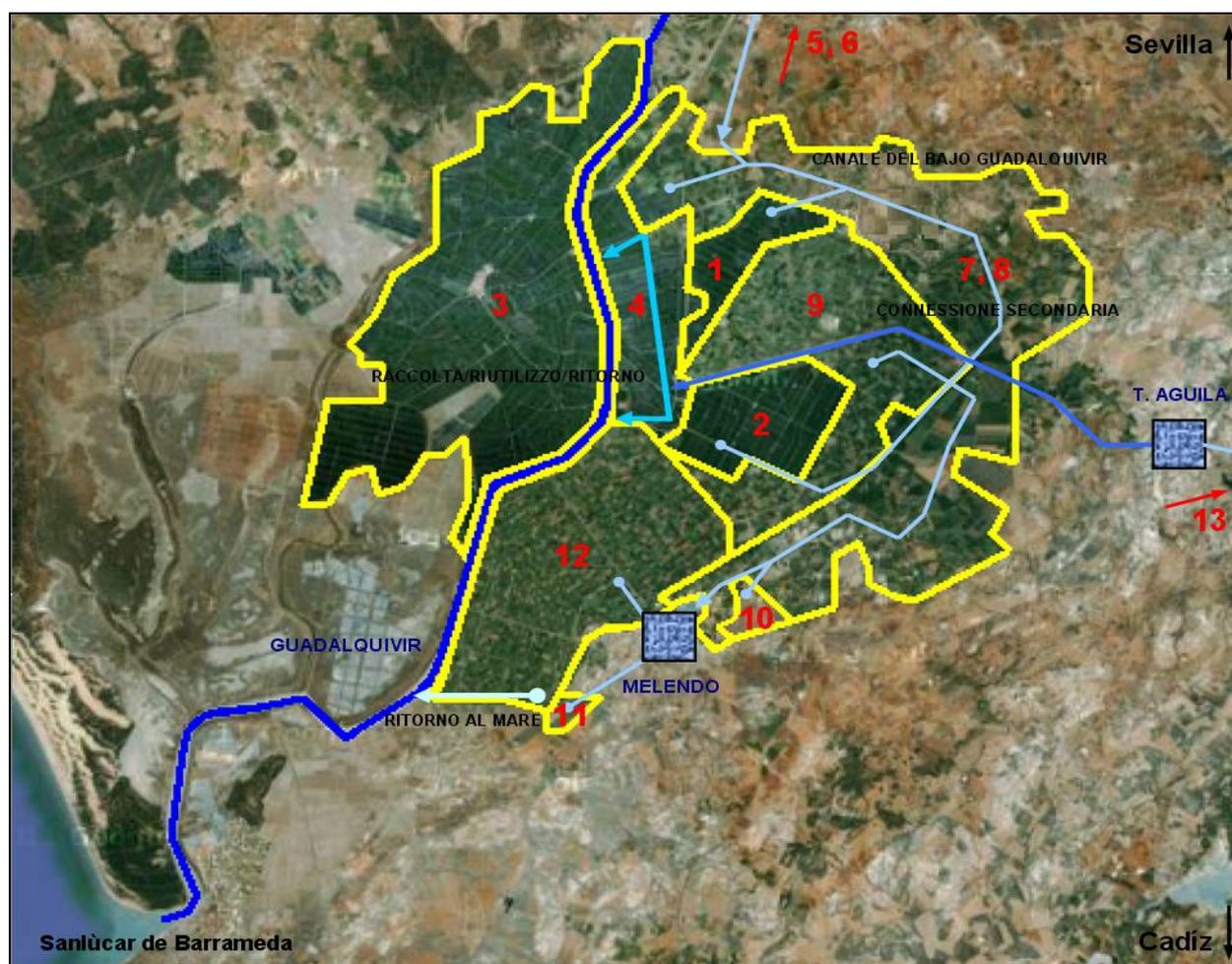
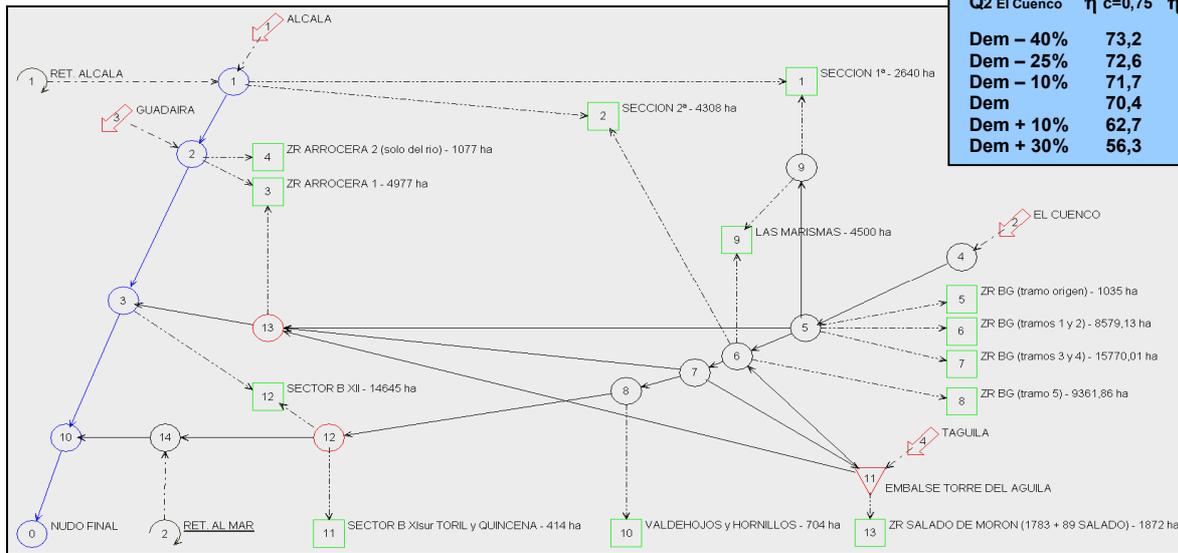


Fig. 2.7 - Cuenca del Bajo Guadalquivir: utenze intervenute, invasi e principali connessioni idrauliche.

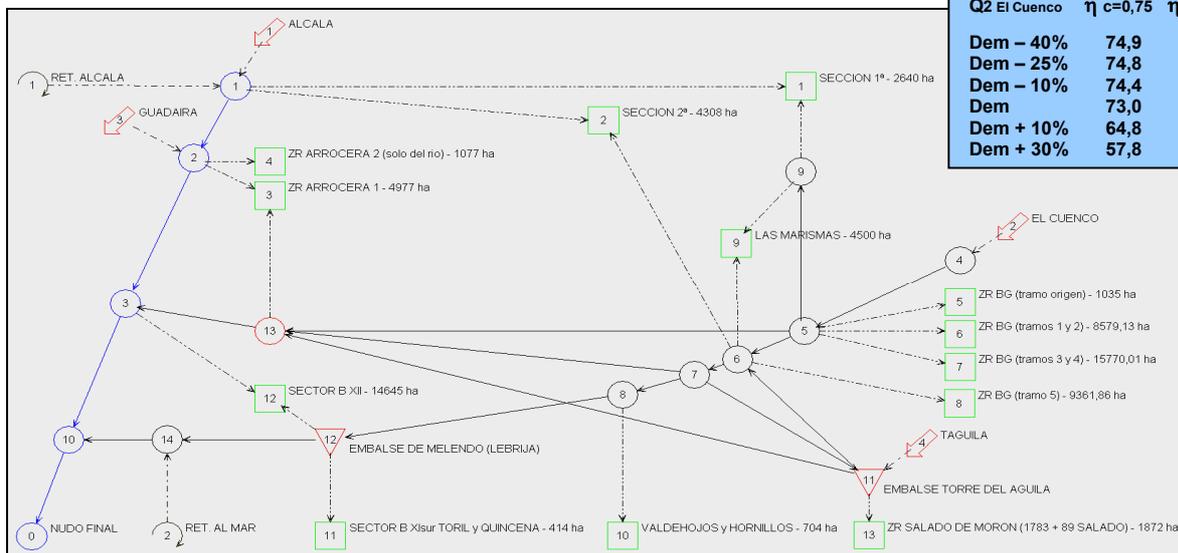
Ad una tale scala, pur senza in alcun modo entrare nel dettaglio degli ordinamenti colturali presenti, il criterio di assegnazione delle portate inerente a ciascuna condizione di funzionamento (contesto originario, schema attuale ed ipotesi in progetto), ha interessato n. 13 distinti subsistemi intervenenti (in forma di “settori” indipendentemente diretti/amministrati da singole autorità locali di competenza) a diseguale priorità di consegna, nota che sia stata la richiesta mensile erogativa per ognuno di essi; a parità di altri ingressi, l’entrata generata nel nodo El Cuenco è risultata pari, superiore o inferiore alla domanda complessiva (dalle somme mensili) per n. 6 casistiche di affluenza applicate. In sede operativa, variazioni di efficienza globale  $\eta$  secondo i consueti scenari di gestione alternativa avranno potuto legarsi al coefficiente di utilizzazione delle acque (pari al 75% di sfruttamento della risorsa in condizioni normali, al 95% con irrigazione migliorata dal ripristino in atto) e, in ultima analisi, anche all’eventualità di riutilizzo per esse (possibilità di ricircolo nei confronti di alcune utenze nel caso in progetto), che indurrebbe sensibilmente ad ottimizzare le prestazioni complessive ( $\eta > 90\%$ ). L’inefficienza è risultata di contro rappresentata dal valore uscente di non utilizzo o non riutilizzo (aliquota al mare, in Sanlúcar de Barrameda); minori ingressi potranno tradursi in perdite inferiori e viceversa.

**A) ORIGINARIO - n. 2 punti di raccolta, invaso T. Aguila**



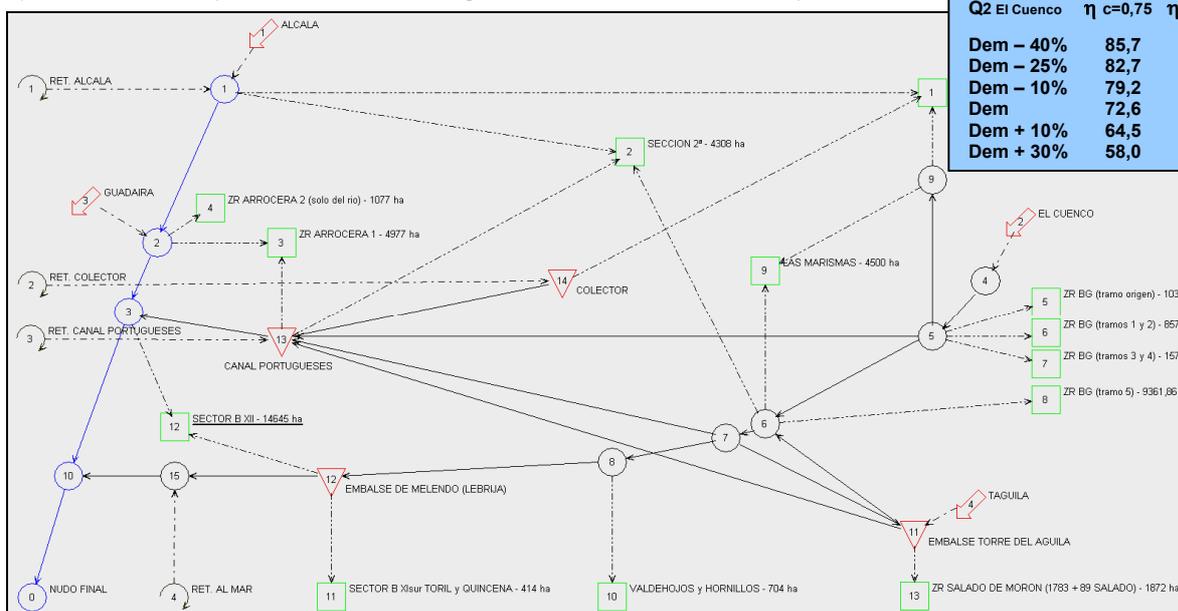
Q2 El Cuenco	$\eta c=0,75$	$\eta c=0,95$
Dem - 40%	73,2	92,2
Dem - 25%	72,6	91,4
Dem - 10%	71,7	90,3
Dem	70,4	88,5
Dem + 10%	62,7	78,9
Dem + 30%	56,3	70,8

**B) ATTUALE - n. 2 punti di raccolta, invasi T. Aguila e Melendo**



Q2 El Cuenco	$\eta c=0,75$	$\eta c=0,95$
Dem - 40%	74,9	94,4
Dem - 25%	74,8	94,4
Dem - 10%	74,4	93,7
Dem	73,0	91,8
Dem + 10%	64,8	81,5
Dem + 30%	57,8	72,7

**C) IN PROGETTO - n. 4 punti di raccolta, invasi T. Aguila e Melendo, collettore/canale acque di ricircolo**



Q2 El Cuenco	$\eta c=0,75$	$\eta c=0,95$
Dem - 40%	85,7	97,0
Dem - 25%	82,7	96,5
Dem - 10%	79,2	95,7
Dem	72,6	91,7
Dem + 10%	64,5	81,7
Dem + 30%	58,0	72,2

Fig. 2.8 - Schemi di funzionamento idraulico ed efficienze relative al variare di afflussi e modalità irrigue.

## **2.6 Riepilogo**

Il progresso tecnologico e la rapida espansione dell'elettronica hanno concretamente incoraggiato la ricerca e l'evoluzione di nuove prospettive di analisi nella riesamina dei sistemi agrari (e non); nel caso specifico dell'irrigazione, al rilevamento e all'osservazione dei principali parametri interessati ed ai modelli di simulazione del bilancio idrologico, sono stati progressivamente affiancati algoritmi per la verifica idraulica delle reti distributive in pressione.

Sistemi di supporto alle decisioni possono all'oggi impegnarsi nella gestione (potenziamento e sviluppo) dei complessi irrigui; consistendo nell'insieme dei mezzi hardware/software atti ad esplorare la quantità di variabili che determinano il comportamento del complesso analizzato, al fine di valutarne la risposta in seguito ad interventi specifici, forniscono supporto ai manager e a tutti coloro i quali si ritrovino ordinariamente impegnati nel prendere decisioni strategiche e operative dinanzi a problematiche eterogenee, non sempre strutturate e solo parzialmente risolvibili dall'operatività in campo; l'informazione necessita di essere memorizzata e frazionata (livelli di aggregazione), così che il decisore possa analizzarla da diversi punti di vista, alle scale rinvenute, sostanzialmente mutando e arricchendo il dato di partenza; pertanto, lo scopo primario di un DSS risulta quello di convertire e/o estrarre flessibilmente da un'estesa mole di dati, e in tempi brevi, associazioni e/o relazioni inizialmente sconosciute all'utente, così da supportare in termini di efficacia il processo medesimo di decisione nel pieno rispetto dei vincoli imposti.

Al di là degli obiettivi e della necessaria conoscenza dei differenti input di sistema, il terzo elemento da tenere in considerazione risulta imprescindibilmente rappresentato dalla particolare struttura cronologica che dal dato iniziale perviene all'output e all'attento esame del ventaglio di strategie ammissibili, tra cui potere e "dover" compiere scelte sensate, vantaggiose e lungimiranti (approccio di lungo periodo). La via per eccellere risulta quella di disporre e strutturare sistematicamente i diversi fattori interlocutori in ciascun singolo studio; solo così operando potranno evincersi il significato e l'importanza dell'impiego del supporto.

Nel caso specifico dell'irrigazione, l'informazione potrebbe essenzialmente investire la valutazione del fabbisogno irriguo colturale attraverso bilanci idrici informatizzati, mentre la soluzione (prodotto in fase decisionale) essere in primo luogo raffigurata dai tempi e dalle stesse modalità di ripartizione dei fabbisogni, fornendo criteri e priorità specifiche di adattamento; in caso di esercizio alla domanda, la distribuzione spazio-temporale dei singoli prelievi può dipendere da due componenti, la prima delle quali deterministicamente correlata all'evoluzione dei processi fisici che regolano l'operato del sistema. La seconda di esse, invece, traspare interamente per via stocastica, derivando dalle modalità di distribuzione irrigua assunte da ciascun agricoltore; trattasi in quest'ottica di una modellistica estremamente complessa, tuttora scarsamente applicabile in

casi reali, la cui intricata natura viene posta in particolare risalto dalla rispondente scala temporale di analisi (ridotta ad intervalli subgiornalieri).

Può ad ogni modo rivelarsi appropriato poter sfruttare approcci intermente meccanicistici, per i quali, in presenza di intervalli di uno o più giorni per la determinazione dei prelievi in rete, il fattore deterministico risulta inequivocabilmente prevalere su quello aleatorio.

Ne deriva pertanto un risultato “unico” per ciascun punto dello spazio ed istante presente o futuro, mirando sinteticamente alla definizione e alla conoscenza dei seguenti aspetti:

- volume irriguo specifico fisso o variabile, in funzione del contenuto idrico nel suolo;
- volume massimo giornaliero a disposizione dell'intero sistema di condotte;
- valore minimo dell'altezza piezometrica alla consegna.

Detti parametri definiscono in maniera sintetica il funzionamento del sistema irriguo e possono essere impiegati per la simulazione di distinti scenari di gestione e l'individuazione di criteri ottimali per la gestione delle risorse idriche disponibili; per altra via, i medesimi punti presi in considerazione risultano implicitamente da riferirsi alla:

- variabilità spazio-temporale del quantitativo ovvero della carenza d'acqua nel suolo;
- variabilità spazio-temporale della richiesta dei coltivatori a fronte di un'offerta limitata;
- capacità strutturale e di trasporto idraulico del canale distributivo in pressione.

La particolare scala applicativa legata all'estensione dell'area di indagine (per cui spaziale, oltre che temporale) influenza significativamente tipi di attività, intenti primari e stessa funzione del DSS proposto per la soluzione di identificate problematiche, in termini di componenti, caratteristiche ed orientamento (quantità e qualità delle analisi, effettive modalità di gestione, conduzione e sviluppo del lavoro).

Validità e rilevanza di quanto svolto e precedentemente osservato mediante l'adozione del SIMODIS ed altri DSS analoghi, potranno essere compiutamente apprezzati ad effetto della seguente esposizione, tesa a verificare come, pur modificando sito di interesse, risulti ancora possibile ottenere soluzioni congrue e bilanciate, oltretutto continuative nel merito delle supposizioni indotte e/o dei possibili criteri per l'attuazione degli interventi irrigui, primariamente legati ai termini del bilancio idrologico delle colture più che al carattere soggettivo di talune scelte al riguardo (lungi pertanto dalla peculiare propensione comportamentale di ciascun individuo); più in generale, lo stesso potrà avvenire nei confronti delle singole metodologie accolte, quale insieme di strumenti, tecnologie e procedure selezionate ed impegnate in corso di indagine.



### **3.1 Aspetto, finalità e prerogative del supporto decisionale**

SIMODIS costituisce a tutti gli effetti un modello di gestione dati che interfacciando i differenti moduli di simulazione, monitoraggio, rilevazione e verifica, semplifica pregevolmente il rapporto con gli utenti (singoli addetti/operatori in materia di irrigazione), più in generale, rivolgendosi a tutti coloro i quali si ritrovino atti ad intraprendere decisioni di carattere strategico sotto il profilo manageriale/operativo in ambito comprensoriale; la sua principale attrattiva consiste nella possibilità di modificare e rettificare una o più variabili di interesse, presentando la richiesta dei coltivatori per via deterministica, concretamente validandone il risultato (o meno) secondo l'utile esposizione di scenari di gestione alternativa.

Il formato esclusivamente digitale agevola la diretta immissione dati in ambiente GIS (moltiplici/distinte componenti di sistema introdotte e relativa classificazione o mappatura), favorendo l'analisi e la comprensione guidata delle singole entrate come delle uscite ovvero delle risposte prodotte in fase di elaborazione.

#### **3.1.1 Struttura operativa: cronologia, fasi e componenti di processo**

Quale diretta conseguenza di un tale approccio sarà la stessa richiesta d'acqua a confrontarsi con la capacità del sistema, sia in termini di trasporto idraulico del canale distributivo in pressione) che di disponibilità idrica; nota quest'ultima, a valle di considerazioni e vincoli ben precisi, diviene possibile individuare quale tra le suddette soluzioni o proposte di intervento risulti più e meglio indirizzata all'incremento dell'efficienza irrigua.

Il blocco (A) rappresenta il modulo di calcolo del bilancio idrologico della coltura: l'unità elementare viene analizzata come una colonna di suolo del tutto indipendente da altre colonne ad essa adiacenti; per ciascuna di esse i processi di trasporto idrico si schematizzano secondo geometrie unidimensionali, ove, a meno della presenza dei moti laterali, il flusso verticale viene simulato con impiego del modello SWAP (per SIMODIS ne costituisce un modulo a parte); quanto alla definizione delle condizioni al contorno superiore, il modulo si avvale delle informazioni ottenute dal telerilevamento, restituendo lo stato idrico del suolo in  $d$ , step temporale giornaliero.

Dall'analisi dei risultati ottenuti, tramite l'insieme di operazioni processate al modulo (B), si rivela possibile identificare singole unità per le quali risulti obbligatorio irrigare, stabilendo il volume di adacquamento in relazione al deficit idrico esistente e/o rispetto alla stessa configura-

zione di portate in rete; nota la distribuzione di domanda, viene elaborato il confronto fra volume irriguo richiesto e disponibilità idrica, come mostrato da modulo (C). Successivamente, come da blocco (D), si perviene alla simulazione idraulica della rete di distribuzione.

Nel blocco (E), viene eseguita la verifica dei carichi piezometrici in rete, appurando che in corrispondenza di ciascun gruppo di consegna tali valori superino la soglia minima prefissata, fino a giungere alla simulazione del bilancio idrologico dell'intervallo  $d + 1$ , per cui ritenendo gli interventi irrigui suggeriti in (B) come effettivamente realizzati e, pertanto, esulando da opportune variazioni nella programmazione.

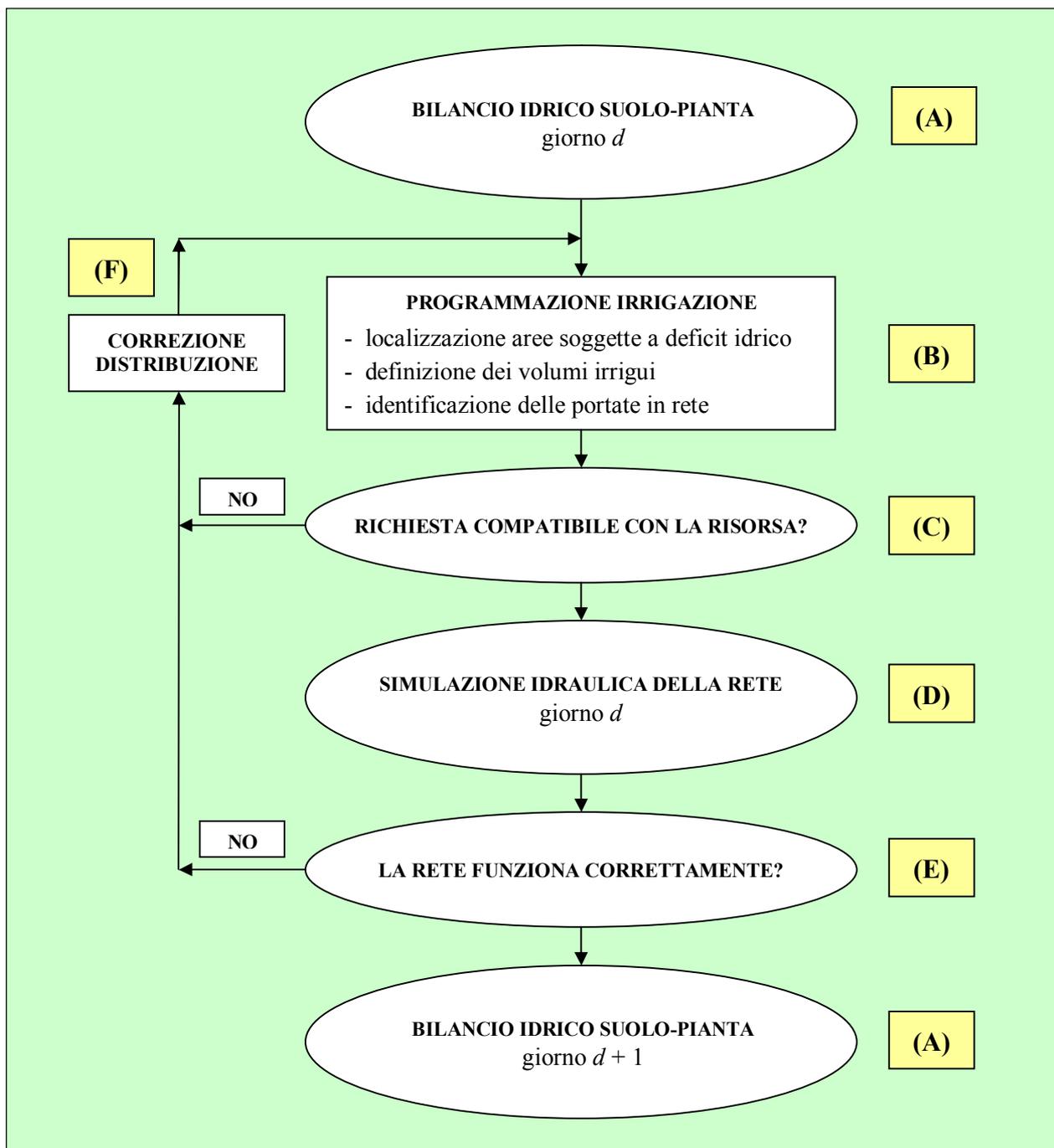


Fig. 3.1 - Struttura procedurale del DSS SIMODIS.

Qualora le condizioni espresse, di cui ai moduli (C) ed (E), non fossero interamente adempite, come da blocco (F), si richiede di rettificare la distribuzione dei volumi irrigui richiesti, necessariamente rimandando l'irrigazione di una o più unità elementari al successivo step temporale; il numero di unità complessive da irrigare viene progressivamente ridotto, fintanto che le rispettive verifiche non risultino positivamente superate.

### **3.1.2 Entità e suddivisione dell'informazione alla scala giornaliera del DSS**

Riguardo a ciascun blocco illustrato/identificato viene espressamente richiesta la conoscenza dei seguenti dati di input, cui attribuire differenti fasi operative e/o di analisi:

- A: vi corrispondono elementi riguardanti la specifica attuazione del bilancio idrologico in SWAP, oltre al resto costituenti essenziali condizioni al contorno inferiori/superiori del modello: tipi di interazione con la circolazione sotterranea (livello/posizione della falda acquifera e modalità del drenaggio in relazione al substrato presente, impermeabile o meno, in ragione delle rilevazioni/supposizioni effettuate), parametri colturali (coefficienti di sviluppo colturale  $k_c$ , indici di area fogliare  $LAI$ , ecc.) e relativa evoluzione temporale con l'ausilio del telerilevamento da satellite, acquisizioni di carattere pedologico (caratteristiche idrauliche dei suoli indagati) e climatico (evapotraspirazione di riferimento e precipitazioni giornaliere) annesse all'area in studio;

- C, E: all'identificazione delle portate in rete (configurazione di partenza), da restituire alla consegna ai fini all'adempimento dei fabbisogni irrigui richiesti dalle singole unità poste a coltura, più o meno soggette a deficit idrico (uscite giornaliere separatamente prodotte dal modello di bilancio idrologico medesimo, raffigurate in B), seguono le predette verifiche di compatibilità tra domanda ed offerta idrica, in C, e funzionamento idraulico globale del canale distributivo anteposto al processo di irrigazione collettiva, in E (più, per entrambi i casi, eventuali correzioni distributive, interne ad F); ai rispettivi blocchi fanno riferimento due dei tre parametri e/o requisiti fondamentali di sistema, fissate e invariabili nel tempo: volume di risorsa idrica disponibile  $V_{RES}$ , rispondente alla dotazione complessiva (anch'essa giornaliera), e valore del carico piezometrico minimo alla consegna  $H_{min}$  (vi risulta implicitamente legato il carico piezometrico disponibile alla testa dell'impianto, in tal caso massimo);

- D: in definitiva, nel mezzo dei punti di controllo descritti (C, E), viene a collocarsi la simulazione idraulica dell'intero sistema, quale nodo centrale della totalità dei flussi e dai livelli di informazione fin qui rilevati e ottenuti, cui aggiungere: attributi inerenti le caratteristiche idrauliche della rete distributiva (materiali, diametri, lunghezza delle condotte, ecc.), elementi di natura topografica, tipologia dei gruppi di consegna in funzione delle dimensioni delle pertinenze (limiti

aziendali e stato di aggregazione/associazione per le stesse aziende), secondo un'architettura gerarchica che, dalla scala primaria dei principali reparti componenti il sistema "i" (settoriale), passa da ultimo prontamente progredire presso punti di consegna e recapito secondario "j" (aziendale) al servizio di una o più unità terziarie "k" (parcelle irrigue alla scala locale).

### 3.1.3 Parametri di impianto e verifiche di funzionamento idraulico

Una volta caratterizzato il sistema indagato, SIMODIS appare dunque pronto a simularne il comportamento, variando tre parametri "globali", così identificati:

- frazione di riempimento  $i_r$  del deficit idrico rispetto alla saturazione, per il calcolo del volume irriguo specifico netto nel suolo occupato dall'apparato radicale;
- volume disponibile giornaliero  $V_{RES}$ ;
- quota piezometrica minima alla consegna  $H_{min}$ .

Sempre noti a priori dell'indagine,  $i_r$ ,  $V_{RES}$  e  $H_{min}$  riguardano l'apparato nel suo complesso e raffigurano "variabili chiave" della gestione consortile.

La somma dei volumi necessari alle parcelle di ciascuna unità secondaria rappresenta invece la distribuzione di domanda giornaliera  $I_{i,j}$ ; affinché tale richiesta sia attuabile, risulta strettamente necessario che siano verificate le tre condizioni:

- 1)  $I_{i,j} \leq Q_{i,j} \cdot \Delta t_{max}$ , dove  $Q_{i,j}$  risulta essere la portata del gruppo di consegna e  $\Delta t_{max}$  il tempo di attivazione massimo;
- 2)  $V_d \leq V_{RES}$ , ove  $V_d$  rappresenta il volume complessivamente richiesto nel giorno  $d$  considerato, ovvero  $I$ , domanda totale di sistema (in tutta l'area), e  $V_{RES}$  quello disponibile;
- 3)  $H_{i,j} \geq H_{min}$ , con  $H_{i,j}$  valore del carico piezometrico alla consegna ed  $H_{min}$  il valore minimo richiesto.

Unicamente quando l'insieme dei requisiti sopra elencati risulta soddisfatto il criterio di distribuzione viene considerato idoneo, pervenendo al bilancio idrologico al giorno successivo.

Come indicato, ciascuna delle limitazioni su esposte può indurre correzioni nella distribuzione irrigua; in particolare, la terza condizione viene verificata attraverso l'adozione di un modello di simulazione del trasporto idraulico, interno alla rete, applicato in condizioni stazionarie nell'ipotesi di funzionamento simultaneo di tutti gli idranti per i quali risulti prevista erogazione. Inoltre, dal momento che la richiesta complessiva dovrà sempre tradursi in differenti configura-

zioni di portata, la verifica andrebbe altresì attuata in riferimento alla situazione più svantaggiosa di domanda sincrona in tutti i nodi della rete, premesso che tale evenienza di accadimento si riveli altamente illogica, per cui improbabile in un contesto ordinario.

Le variazioni nel merito della stessa distribuzione irrigua  $I_{i,j}$  vengono specificamente ottenute in relazione alla durata di funzionamento dei gruppi di consegna (dal rapporto  $Q_{i,j}/I_{i,j}$ ) ed in base a criteri di priorità, solitamente legati alla tipologia colturale, oltre che in dipendenza del livello di deficit preliminarmente riscontrato.

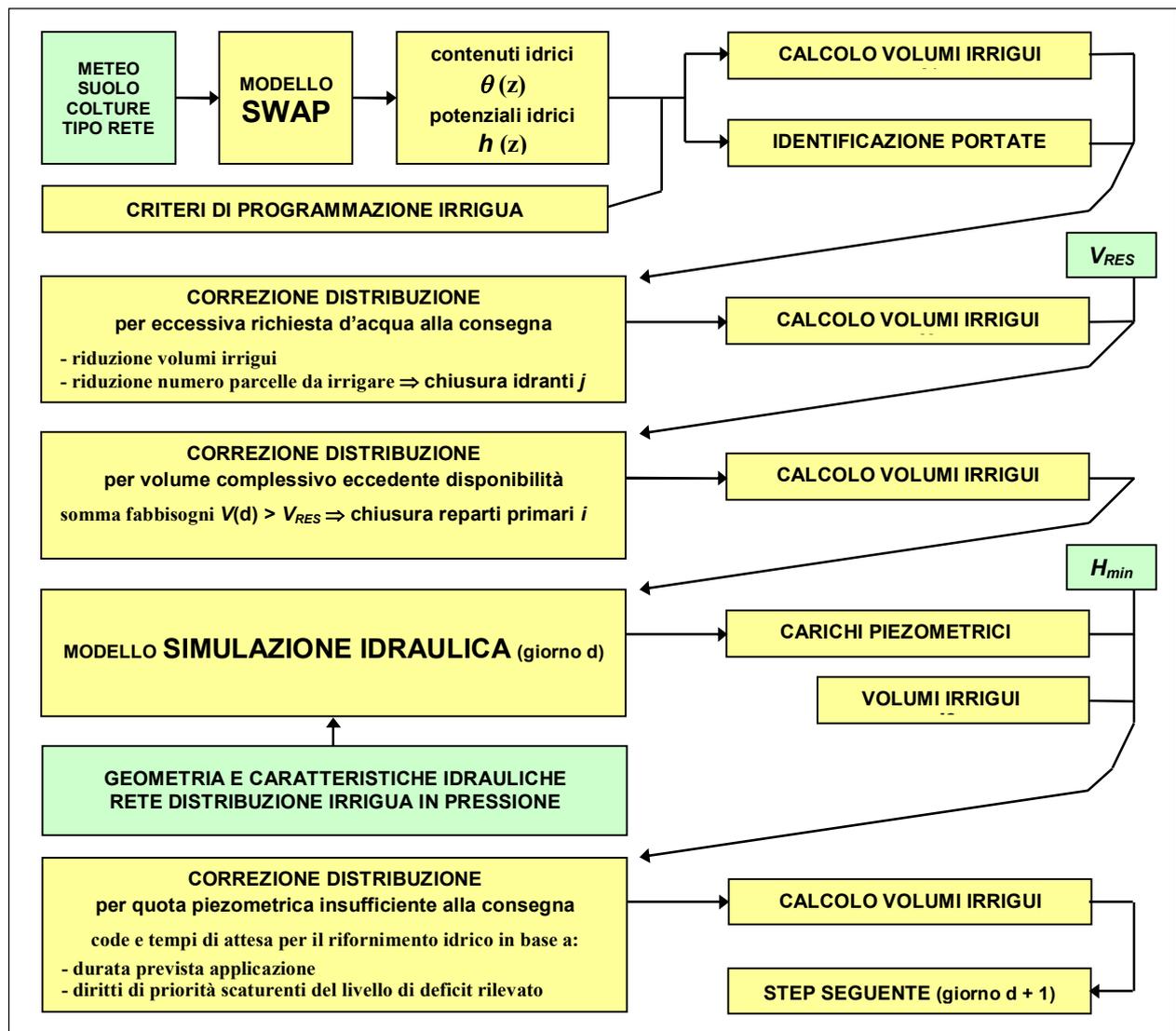


Fig. 3.2 - Flussi operativi alla scala giornaliera del prototipo (informazioni in entrata e verifiche annesse).

Quanto infine, al valore del parametro  $i_r$ , strettamente legato alle scelte gestionali dei singoli agricoltori (criteri irrigui dal carattere fortemente soggettivo), esso deve inevitabilmente intendersi quale rappresentativo delle modalità di somministrazione irrigua dell'azienda "media" del comprensorio, nel contesto di una descrizione puramente deterministica del funzionamento globale di impianto.

L'Ente consortile è difatti richiamato a modulare il volume di risorsa idrica in funzione delle esigenze (oltre che della disponibilità); ed è sempre il gestore, mediante l'esercizio e la regolazione della rete, ad assicurare la presenza di un dato valore del carico alla consegna  $H_{min}$  e, più in generale, a favorire ovvero ad agevolare la resa operativa delle diverse componenti di impianto.

### 3.2 Attuazione e relativi sviluppi del modello: comprensione degli input/output di sistema

Al carattere generale delle considerazioni fin qui esposte, per lo più inerenti le singole fasi di impiego del SIMODIS nella sua interezza e complessità, occorre affiancare elementi e aspetti di maggior dettaglio/rilievo alla scala giornaliera proposta dal modello di bilancio e simulazione idrologica e colturale, in relazione ad alcune tipologie di dato in input e, per il tramite di queste, riguardo ai processi fisici direttamente implicati o intervenenti nel sistema suolo-pianta.

Per tutte le parcelle di riferimento, il valore di evapotraspirazione potenziale  $ET_p$  risulta ad esempio imprescindibilmente associato al particolare microclima dell'area indagata; ne derivano, pertanto, la valutazione del fattore evapotraspirativo di riferimento  $ET_o$  (par. 3.2.1) ed interpolazioni giornaliere dei coefficienti di sviluppo colturale  $k_c$  periodicamente ottenibili con ausilio del telerilevamento nell'arco temporale indicato, tipicamente stagionale; più in generale, la procedura di definizione del dato in input richiede la ricognizione sistematica dell'insieme di condizioni al contorno inferiori/superiori, essenziali ai fini dell'applicabilità del modello (par. 3.2.2).

Ammesso di aver caratterizzato nel dettaglio una data area presa in esame (singoli ingressi del modello noti), viene fornita una prima descrizione di carattere qualitativo sul processo di moto di infiltrazione nel sottosuolo (par. 3.2.3); vi segue un'esposizione dettagliata sulle funzionalità alla base del modulo SWAP (par. 3.2.4) di bilancio idrologico, atto ad integrare il trasporto di acqua, soluti e calore per suoli saturi e insaturi interagendo con lo sviluppo vegetativo delle piante secondo le più recenti concezioni modellistiche.

Seguono ancora la stima del valore di attingimento radicale delle colture (per scissione dei contributi evapotraspirativi relativi a suoli e colture presenti), che non può prescindere dal livello di traspirazione potenziale delle stesse piante in corrispondenza di un dato valore del potenziale idrico (par. 3.2.5), e la presentazione dei criteri di programmazione/somministrazione irrigua, ad apporto irriguo fissato o variabile in special modo, su base specifica del livello di deficit di volta in volta raggiunto (par. 3.2.6).

In ultimo, vengono illustrate ipotesi e relazioni assunte dal modello di trasporto idraulico in condizioni di moto stazionario uniforme adottato dal SIMODIS per la verifica della rete in pressione tramite impiego delle formulazioni di Colebrook-White e Darcy-Weisbach per la stima del fattore adimensionale di resistenza e delle perdite di carico in condotta (3.2.7).

### 3.2.1 Evapotraspirazione di riferimento

La valutazione del fattore evapotraspirativo richiede un modello analitico che considera le relazioni del bilancio energetico e del trasporto turbolento sviluppate dall'originaria formulazione di Penman (1948); un tale controllo, i cui meccanismi si mostrano ancora una volta piuttosto complessi in virtù dell'ampiezza e dalla vastità della gamma dei processi annessi e intervenenti, può semplificarsi assumendo che nel passaggio dalle cavità stomatiche alla superficie fogliare, e, seguitamente, di qui in atmosfera, il vapor acqueo incontra due resistenze operanti in serie: la resistenza del manto vegetale  $r_c$  e quella aerodinamica  $r_a$ .

Per una realistica rappresentazione del dinamismo legato al fenomeno, la relazione di Penman-Monteith (1965) simula il comportamento di qualsiasi tipo di coltura, in qualsivoglia condizione di rifornimento idrico, una volta che siano noti i succitati indicatori o valori di attrito.

Se ne riporta la forma particolareggiata al caso di riferimento che prevede: albedo  $r = 0,23$ , altezza del manto  $h_c = 12$  cm,  $LAI = 2,88$ ,  $r_c = 70$  s/m,  $r_a = 208/u_2$  s/m, a calore latente  $\lambda$  costante ( $\lambda = 2,45$  MJ/Kg a 20 °C), per la stima evapotraspirazione  $ET_o$  (mm/d), quale input indispensabile del modello di simulazione colturale (in cm/d):

$$ET_o = \frac{0,408 (R_n - G_o) + \xi \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \xi (1 + 0,34u_2)} \quad (3.1)$$

Tale relazione, che si esplica come la somma di due termini del bilancio energetico (radiativo ed aerodinamico), include parametri meteorologici e termometrici, quali la radiazione netta solare  $R_n$  (W/m<sup>2</sup>d), il flusso di calore nel suolo  $G_o$  (W/m<sup>2</sup>d), la pendenza della curva temperatura - pressione di vapore  $\Delta$  (kPa/°C), la costante psicometrica  $\xi$  (kPa/°C), il deficit  $\delta_e = e_s - e_a$  (kPa) di pressione di vapore correlato a misure di umidità nell'aria  $RH$  (%), la temperatura giornaliera media  $T$  dell'aria (°C) e la velocità del vento  $u_2$  (m/s) a 2 m di altitudine dal piano campagna.

Di fianco ad  $ET_o$ , vengono richieste misure di piovosità giornaliera lorda; il modello stesso prevedrà il calcolo della precipitazione netta  $P$  (cm/d) a partire dagli afflussi meteorici misurati e immessi al suo interno.

### 3.2.2 Altre variabili in ingresso

Ai fini dell'elaborazione complessiva, SWAP richiede la discretizzazione delle colonne di suolo in zone di spessore più o meno variabile; il modello assegna un nodo di riferimento al baricentro di ciascuna zona. Riguardo a ciascuna colonna (singola parcella individuata dell'analisi), oltre ad informazioni specifiche sulle colture presenti (vi risultano abbinati determinati valori del

potenziale critico) e relative profondità radicali, occorre altresì disporre di un'unità pedologica di riferimento (vi corrisponde una distinta parametrizzazione idrologica alla scala associata).

L'ultima variabile in ingresso viene rappresentata dalla frazione di copertura del manto vegetale  $s_c$  per il tramite dell'indice di area fogliare  $LAI$  secondo l'espressione esponenziale:

$$s_c = -0,0038 LAI^4 + 0,054 LAI^3 - 0,3 LAI^2 + 0,8199 LAI \quad (3.2)$$

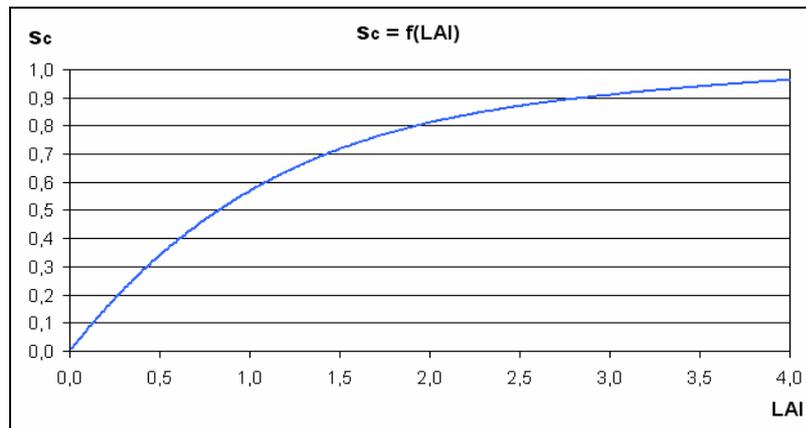


Fig. 3.3 - Legame tra LAI e frazione di copertura vegetale  $s_c$ .

SWAP lega inversamente gli stessi parametri attraverso l'introduzione e l'impiego combinato dei coefficienti  $a$ ,  $b$ ,  $c$  tali da minimizzare la somma gli scarti al quadrato tra  $LAI^*$  e misure di  $LAI$  telerilevate per la durata temporale richiesta dall'analisi (Welles e Norman, 1991):

$$LAI^* = a \cdot s_c + b \cdot s_c^2 + c \cdot s_c^3 \Rightarrow (LAI - LAI^*)^2 \cong 0 \quad (3.3)$$

### 3.2.3 Fenomeni di infiltrazione nel sottosuolo

In forma autenticamente qualitativa, il processo di moto dell'acqua nel suolo può ricondursi ad un alternarsi di fenomeni di infiltrazione e redistribuzione in continua evoluzione temporale (Santini, 1975); apporti meteorici e/o artificiali si infiltrano dalla superficie del terreno, gradatamente impegnando spazi sempre maggiori del profilo.

Tale processo di infiltrazione evolve all'interno di un profilo omogeneo, inizialmente caratterizzato da contenuti d'acqua modesti o relativamente elevati: risulta evidente lo stabilirsi di una "zona di transizione/trasmissione" ove gli stessi valori potranno solo minimamente variare con la profondità; appena più in basso, segue una seconda "zona di inumidimento", per contenuti idrici in rapida diminuzione fino al raggiungimento del valore iniziale in prossimità del "fronte di infiltrazione", che, al termine dell'alimentazione superficiale, continua lentamente a progredire verso gli strati inferiori con velocità decrescente nel tempo; l'acqua, pertanto, muove interessando spazi sempre più profondi, abbandonando le zone superficiali ad elevato grado di saturazione.

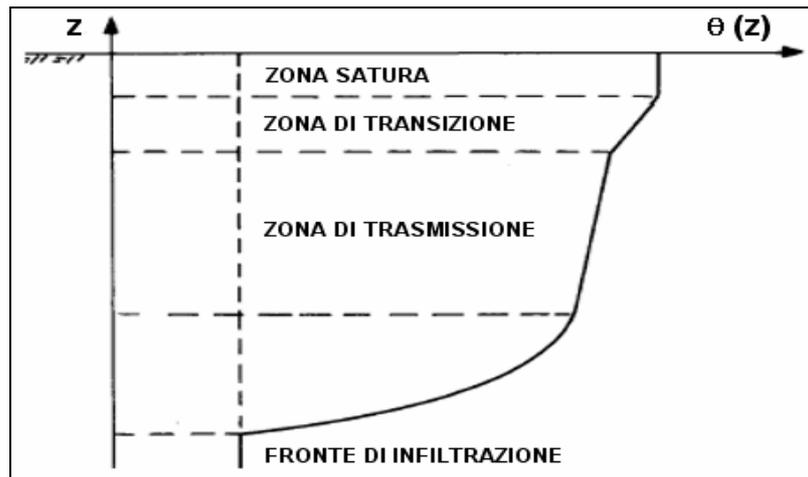


Fig. 3.4 - Profilo generico di contenuto idrico associato al processo di infiltrazione.

Di contro, processi di evaporazione diretta dalla sommità del terreno e/o fenomeni di attingimento da parte degli apparati radicali delle piante possono notevolmente ridimensionare il contenuto idrico della “zona satura” in superficie, immediatamente al contatto con l’aria; per effetto dell’intensificarsi degli stessi moti evapotraspirativi, come in particolare presenza di falde site a ridotta profondità, il flusso instauratosi potrebbe perfino divenire inverso e ascendente.

Attività, dinamismo e stessa durata temporale dei processi elementari descritti, risultano tali da consentire al suolo di svolgere un’utile e preziosa funzione di immagazzinamento d’acqua e sostanze nutritive in essa disciolte, così che le colture siano in grado di fronteggiare la domanda traspirativa (da considerarsi essenzialmente come continua, anche quando l’alimentazione idrica, per precipitazioni o interventi irrigui, risulti irregolare o interamente assente per lunghi periodi).

### 3.2.4 Bilancio idrologico alla scala locale delle parcelle irrigue: il modulo SWAP

Procedendo nel dettaglio delle relazioni del bilancio idrologico alla scala locale delle unità coinvolte nell’analisi, SIMODIS opera adottando una versione modificata e sostanzialmente attualizzata del modello SWAP (*Soil Water Atmosphere Plant*), sviluppato dall’Istituto di Ricerca Alterra, associato all’Università di Wageningen, in Olanda, quale successore dello SWATRE ed altri modelli da esso derivanti, e basato sulla soluzione della nota equazione di Richards (1931):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} \pm 1 \right) \right] - S(h) \quad (3.4)$$

Lo schema di calcolo risulta concepito per estendere la modellazione in direzione verticale, dal piano campagna alla falda acquifera, secondo geometrie unidimensionali che ben si prestano a riprodurre i fenomeni di scambio agenti ad una tale scala; in virtù del complesso di interazioni descritte, la simulazione viene ad esplicarsi per step temporali finanche dell’ordine dei secondi.

Tali processi, descrittivi i criteri di infiltrazione dell'acqua nel terreno ad opera di schemi numerici alle differenze finite (Van Dam et al., 1997), richiedono altresì l'adozione delle funzioni idrauliche del terreno, implicitamente iterate con passo giornaliero dalle note espressioni analitiche di Van Genuchten (1980) e Mualem-Van Genuchten (1976; 1980), nei confronti della ritenzione idrica e della conducibilità idraulica.

Oltre alla componente matriciale o di pressione del potenziale idrico  $h$  (cm), alla conducibilità idraulica  $k$  (cm/d) e al contenuto idrico volumetrico  $\theta$  (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>), all'interno dell'espressione vi figurano altresì un termine additivo  $S(h)$  (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>d) di attingimento radicale per unità volumetrica di suolo e  $C(h)$  (d<sup>-1</sup>), capacità capillare del mezzo poroso.

A causa della forte dipendenza sia di  $k$  che di  $h$  da  $\theta$ , l'equazione differenziale proposta risulta fortemente non lineare e viene risolta esclusivamente per via numerica; la sua soluzione richiede opportune condizioni iniziali e al contorno (Belmans et al., 1983; Santini, 1992), di fianco alla definizione delle funzioni di ritenzione idrica  $h(\theta)$ , comodamente esprimibile in forma inversa  $\theta(h)$ , e di conducibilità idraulica  $k(h)$  o analogamente  $k(\theta)$ . Tale precisazione si rende necessaria allo scopo di poter richiamare all'attenzione i suddetti modelli parametrici di Van Genuchten e Mualem-Van Genuchten, atti alla caratterizzazione separata delle proprietà idrauliche:

$$\theta(h) = \theta + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{\left(1 - |\alpha \cdot h|^n\right)^m} \quad (3.5)$$

$$k(h) = k_{sat} S_e^l \left[ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m \right]^2 \quad (3.6)$$

Riguardo alla stima puntuale delle rispettive curve, possono emergere differenti comportamenti delle principali classi di terreno: tipologie sabbiose, ad esempio, manifestano conducibilità più elevate rispetto al caso dei suoli argillosi, mentre inversa si rivela la stessa reazione per valori del potenziale prossimi della saturazione, in ragione delle diversità rivelate dai due tipi in merito alla diffusione di frequenza del diametro dei vuoti e della tortuosità.

La stima sperimentale della seconda funzione di conducibilità, non direttamente misurabile, pone problemi di gran lunga superiori rispetto a quelli della funzione di ritenzione.

Per saturazione parziale, infatti, parte dei pori del mezzo risulta impegnata dalla fase gassosa; alla diminuzione dell'area utile al moto, che di contro può interessare unicamente la frazione occupata dalla fase liquida, si associano sempre incrementi della tortuosità dei percorsi in grado di condurre acqua. Quale diretta conseguenza di ciò, se ne deduce come il parametro  $k$  possa variare di diversi ordini di grandezza, anche per uno stesso terreno, al variare del contenuto idrico  $\theta$  o comunque del potenziale  $h$ .

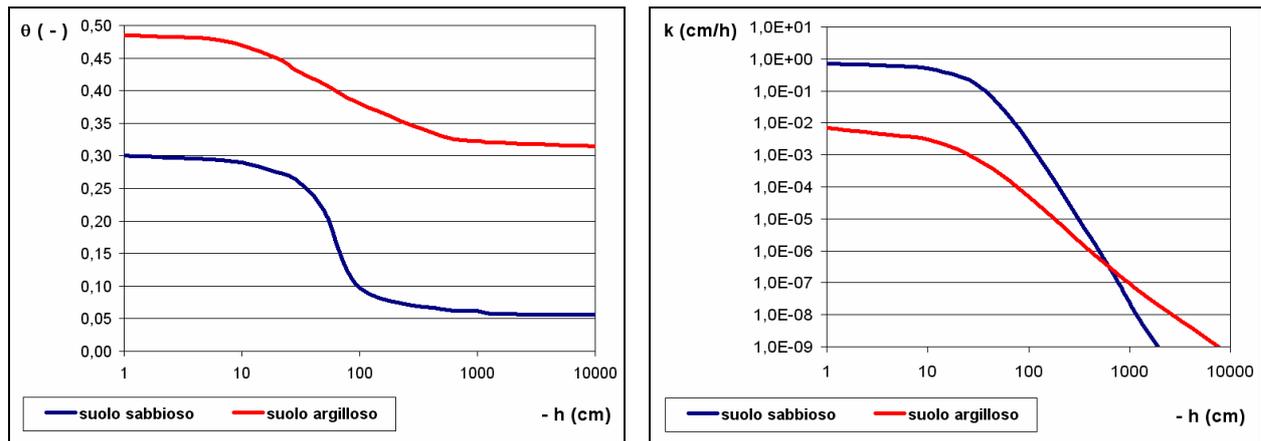


Fig. 3.5 - Andamento delle funzioni idrauliche di ritenzione e conducibilità in suolo sabbioso e argilloso.

I parametri  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $n$  ed  $m$  individuano la forma della curve sopraindicate (al fine di ottenere valori più stabili ed agevolmente computabili pur utilizzi di routine, può porsi  $m = 1 - 1/n$ ); della tortuosità, infine, si tiene conto attraverso il parametro  $l$  della seconda relazione di conducibilità, appositamente calcolato oppure ritenuto costante e pari a 0,5.

Il contenuto idrico massimo del mezzo poroso, riferito alla condizione di saturazione completa dei vuoti, viene individuato definendo il grado di saturazione  $S$  quale rapporto fra contenuto d'acqua generico  $\theta$  nel terreno per l'istante temporale considerato e  $\theta_{sat}$ ; in quanto le condizioni estreme, di saturazione completa ( $S = 100\%$ ) o di suolo asciutto ( $S = 0\%$ ) risulterebbero oltremodo rare da raggiungere, tanto in campo quanto in laboratorio, si suole definire un contenuto residuo  $\theta_{res}$  e riferirsi alla cosiddetta saturazione effettiva  $S_e$  (pari ad  $S$  solo nel caso in cui  $\theta_{res} = 0$ ):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (3.7)$$

### 3.2.5 Stime di evapotraspirazione e attingimento radicale delle colture

L'evapotraspirazione potenziale  $ET_p$  (cm/d) viene stimata secondo  $ET_o$ , noti che siano i valori del coefficiente colturale  $k_c$  per l'arco temporale indagato, attraverso il legame:

$$ET_p = k_c \cdot ET_o \quad (3.8)$$

L'attingimento idrico radicale delle colture risulta invece apprezzato dalla figura del termine additivo dell'equazione di Richards, fornendo la traspirazione giornaliera della pianta come la somma degli attingimenti giornalieri alle differenti profondità, con la generica colonna di suolo, ivi definita, di conseguenza suddivisa in subzone o comparti (*layers*).

Indicati rispettivamente con  $z_{root}$  (cm) e  $T_p$  lo spessore radicale a densità costante, alla profondità  $z$  indagata, e la traspirazione potenziale della coltura, in accordo al criterio di scomposi-

zione per l'evapotraspirazione potenziale  $ET_p$  nei due contributi  $E_p$  e  $T_p$  di evaporazione dal suolo e traspirazione della pianta tramite il  $LAI$  (Ritchie, 1972), l'attingimento potenziale  $S_p$  ( $d^{-1}$ ) risulta definito dalla relazione:

$$S_p(z) = T_p / z_{root} \quad (3.9)$$

$T_p$  risulta stimato per differenza a partire da  $ET_p$  nota che sia l'evaporazione potenziale  $E_p$ ; di contro, l'attingimento reale viene determinato come quota di quello potenziale secondo appositi coefficienti di riduzione da stress idrico  $\alpha_{rw}$  e salino  $\alpha_{rs}$  (Feddes et al., 1978), con la traspirazione attuale ottenibile dall'integrazione dell'attingimento reale all'interno delle predette ripartizioni di suolo, nell'ipotesi che sia  $S_a = T_a$  (nella realtà, non tutta l'acqua assorbita viene traspirata, ma in minima parte anche impiegata nei processi metabolici, con  $S_a \cong T_a$ ):

$$S_a(z) = \alpha_{rw} \cdot \partial_{rs} \cdot S_p(z) \quad (3.10)$$

$$T_a = \int_0^{z_{root}} \alpha_{rw} \cdot \partial_{rs} \cdot S_p(z) \quad (3.11)$$

In assenza di stress salino, il rapporto  $T_a/T_p$  (variabile tra 0 ed 1, per  $T_a = 0$  e  $T_a = T_p$ , dunque per attingimento nullo e massimo), può ridursi alla sola definizione del coefficiente di stress idrico  $\alpha_{rw} = \alpha$ , in funzione del potenziale idrico e del tasso di traspirazione potenziale  $t$  (cm/d).

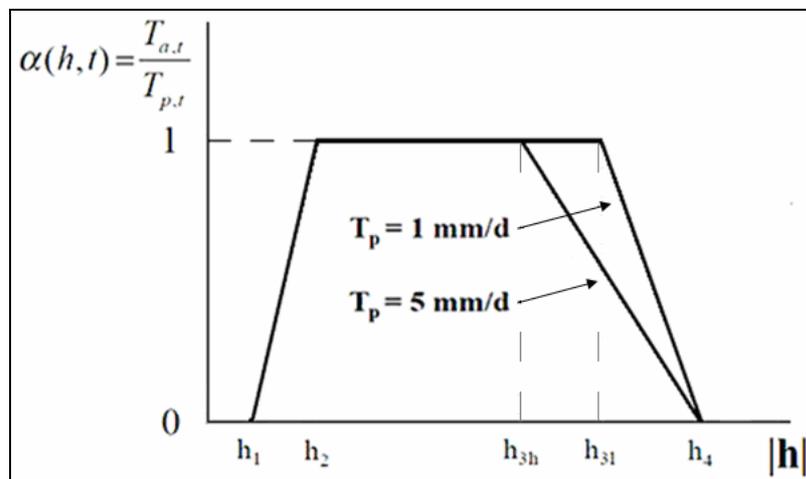


Fig. 3.6 - Funzione di riduzione del potenziale di Feddes.

Per elevati valori del contenuto idrico, il potenziale appare primariamente legato alla porosità del terreno: da parte delle radici, l'estrazione d'acqua dal suolo avrebbe luogo solo ed esclusivamente al di sotto del valore  $h_1$  (al di sopra, l'attingimento risulterebbe impedito in condizioni di anaerobiosi per eccesso di fase liquida all'interno dei pori, prossima se non completamente pari alla saturazione);  $h_2$  raffigura, di contro, il valore al di sotto del quale le stesse radici potranno

attingere in maniera ottimale, fino al potenziale  $h_{3m}$  (ovvero  $h_{avg}$ ), medio tra  $h_{3h}$  ed  $h_{3l}$  (high/low) nei riguardi di ciascuna coltura, al di sotto dei quali l'estrazione d'acqua da parte delle radici risulta più faticosa (soglia critica), con tipici valori di traspirazione potenziale  $T_p$  associata nei nostri climi (5 mm/d, 1 mm/d);  $h_4$ , in conclusione, evidenzia il limite oltre il quale le radici non saranno più in grado di emungere (punto di appassimento e chiusura stomatica nelle piante).

L'evapotraspirazione attuale  $ET_a$  viene da ultimo ottenuta da  $ET_p$  ad opera di elaborazioni funzionali al volume specifico di riserva idrica nel sottosuolo (contenuto idrico mediamente presente, anche ad effetto della particolare piovosità riscontrata); SWAP può in questo caso risalire al valore dell'evaporazione attuale  $E_a$  per differenza tra  $ET_a$  e  $T_a$  (appunto ottenuta come aliquota di  $T_p$  a mezzo dei coefficienti di riduzione sopraindicati).

### **3.2.6 Criteri di programmazione irrigua in SIMODIS: calcolo dei volumi di intervento**

In presenza di vincoli al contorno (risorse idriche limitate e/o costi elevati per gli stessi interventi), l'approccio tradizionale al problema di quanta acqua somministrare in relazione a ciascuna adacquata si fonda sulla logica di distanziare il più possibile i contributi singoli riducendo l'impegno della manodopera; il calcolo dei volumi di intervento deve però condursi nell'ottica di assistere la pianta non appena il contenuto idrico dello spessore utile agli scopi dell'assorbimento radicale raggiunga il punto critico colturale, per poi riportarlo alla capacità di campo, tendendo a sfruttare la cosiddetta "capacità idrica facilmente utilizzabile" dello strato utile medesimo.

Tra le diverse opzioni in seno al SIMODIS, più in particolare, vi è quella di poter adottare apporti irrigui fissati o variabili, nel primo caso, dipendenti dal solo valore del potenziale critico (prescindendo, pertanto, dal livello di deficit di volta in volta raggiunto in coincidenza di una data e suggerita profondità), nel secondo, invece, da entrambe le quantità; il superamento della soglia critica di potenziale per lo spessore di suolo indicato viene pertanto a raffigurare una condizione necessaria (sul quando irrigare) per l'immediata attuazione della conseguenza (sul quanto irrigare), espressamente riferita alla frazione  $i_r$  di riempimento del deficit d'acqua nel suolo.

Dall'analisi dei profili verticali di contenuto d'acqua  $\theta(z)$  e potenziale idrico nel suolo  $h(z)$ , possono individuarsi singole parcelle irrigue per le quali si manifestino particolari condizioni di stress idrico delle colture (Bastiaanssen et al., 2007; Elmaloglu e Malamos, 2000), ad opera di un confronto specifico tra valori di potenziale idrico, medio nella zona dell'apparato radicale  $h_{avg}$ , e critico  $h_{crit}$ , dipendente dalla tipologia colturale analizzata; in conseguenza di ciò, l'intervento irriguo dovrà compiersi per effetto del mancato adempimento della condizione  $|h_{avg}| < |h_{crit}|$ , col deficit idrico  $\delta$  rispetto alla saturazione  $\theta_{sat}$  in  $\Delta z$ , spessore di terreno interessato dalla presenza delle radici, che invece potrà ricavarsi ogni qual volta venga superata la soglia critica predetta:

$$\delta = \int_z^{z+\Delta z} [\theta_{sat}(z) - \theta(z)] dz \quad (3.12)$$

Potrà dunque ottenersi il volume irriguo  $I_o$  ( $m^3$ ) da applicare:

$$I_o = 100 i_r \cdot \delta \cdot A / \eta \quad (3.13)$$

$A$  rappresenta la superficie della particella e  $\eta$  il valore dell'efficienza irrigua aziendale; effettuando la medesima operazione per tutte le  $k$  parcelle del comprensorio irriguo in esame, viene determinata una prima distribuzione della domanda d'acqua nel giorno  $d$  considerato:

$$I_{i,j,k} = 100 i_r \cdot \delta_{i,j,k} \cdot A_{i,j,k} / \eta_{i,j,k} \quad (3.14)$$

*Esempio:* sia  $\delta = 6$  cm il valore di deficit idrico rispetto alla saturazione, appuratosi all'instaurarsi della condizione  $|h_{avg}| \geq |h_{crit}|$ , con falda sita a 2 m di profondità dal piano campagna; nell'ipotesi di avere assunto  $i_r = 0,4$  (40%  $\delta$ ),  $I_o = 6 \cdot 0,4 = 2,4$  cm risulta il quantitativo irriguo da somministrare per unità di area, in assenza di perdite per trasporto e tipo di distribuzione a livello aziendale (efficienza unitaria).

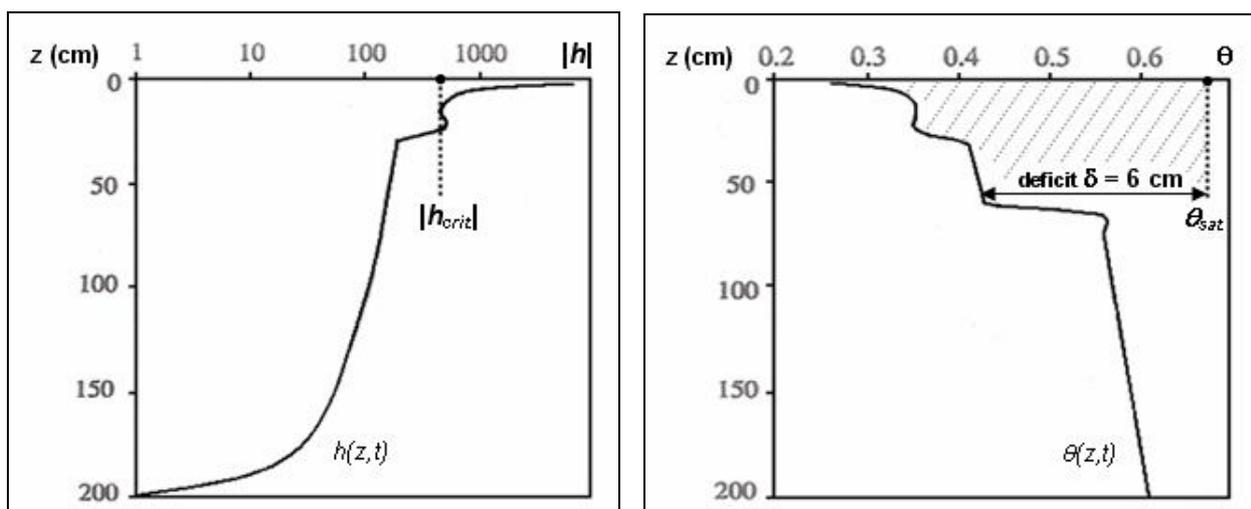


Fig. 3.7 - Tipico esempio di output inerente la distribuzione verticale di potenziale e contenuto idrico.

L'efficienza per adduzione, trasporto e stessa distribuzione del metodo in pressione si rivela in sé alquanto elevata (quasi doppia nei confronti del caso gravimetrico); l'effetto del recente ammodernamento del sistema di condotte all'interno dell'area comprensoriale prescelta, avrà in tal senso indotto a non apprezzare eventuali perdite occorse alla scala dei singoli reparti e/o delle rispettive pertinenze (siti di recapito secondario e terziario), da cui un valore di efficienza  $\eta$  unitaria (al contrario, SIMODIS comporterebbe la sottostima dei relativi fabbisogni aziendali); una mappatura dettagliata sulle tipologie di impianto diffusamente presenti/installate all'interno della stessa area consentirebbe senz'altro la non omissione di informazioni relative al grado di inefficienza aziendale puntualmente addotta.

### 3.2.7 Simulazione idraulica della rete in condizioni di moto uniforme e stazionario

Si richiede infine di individuare e verificare il funzionamento della rete di distribuzione irrigua in pressione (problema di verifica), ovvero di determinare il valore delle portate  $Q_{ij}$  percorrenti i singoli tratti (involucri rigidi e scabri) e dei carichi  $H_{ij}$  nei nodi della stessa; queste correnti si differenziano profondamente da quelle a superficie libera (in alveo, per fiumi, torrenti, canali, ecc.) a diretto contatto con l'atmosfera esterna e dunque soggette a pressione ambiente.

L'ipotesi alla base del flusso risulta quella di moto uniforme (viene a verificarsi solo in caso di correnti rigorosamente lineari, per le quali sezione risulti costante rispetto all'asse della corrente medesima); il campo di velocità non varia nella direzione del moto, restando inalterato anche nel tempo, da cui la seconda ipotesi di permanenza o stazionarietà (pressione e velocità invariate; ne consegue accelerazione nulla in ciascun punto della tubazione), e si ottiene:

$$Q = v \cdot \sigma = cost \quad (3.15)$$

Per il principio di conservazione della portata, solo una variazione di sezione può essere in grado di determinare alterazioni del campo di velocità all'interno di uno stesso ramo di condotta.

In definitiva, il quesito essenziale riguarda l'individuazione delle relazioni fra perdite di carico (distribuite o concentrate) e le altre grandezze da cui queste dipendono:

- specificatamente relative al condotto: scabrezza delle pareti  $\varepsilon$  (mm) sezione  $\sigma$  (mm<sup>2</sup>), ovvero diametro  $D$  (mm) per forma circolare della condotta, e lunghezza  $L$  (m) dei singoli tratti;
- prettamente cinematiche: portata  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) e velocità  $v$  (m/s), per quanto appena precisato, anch'esse proprie del tratto indagato.

La riduzione del carico idraulico riferito alla corrente viene indotta dalla presenza di sforzi tangenziali sul bordo laterale; per un fluido reale, tale riduzione si rivela anch'essa costante e più esplicitamente da attribuirsi alla dissipazione di energia potenziale, energia di pressione ed energia cinetica tra due sezioni (individuata dai punti 1 e 2), venendo altresì denominata cadente piezometrica  $J$  (m/m):

$$J = -\frac{\partial}{\partial s} \left( z_b + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \right) = cost \quad (3.16)$$

$$H_1 - H_2 = z_{b1} + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - z_{b2} - \frac{p_2}{\gamma} - \frac{v_2^2}{2g} = \Delta H = J \cdot L \quad (3.17)$$

$$z_{b1} + \frac{p_1}{\gamma} - z_{b2} - \frac{p_2}{\gamma} = \Delta H = J \cdot L \quad (3.18)$$

Del tutto in linea col principio di conservazione dell'energia meccanica, quest'ultima relazione, di interesse specifico all'interno del SIMODIS (in condizioni di moto uniforme e stazionario per fluidi reali), deve specificatamente intendersi riferita al caso in cui  $v_1 = v_2 = v$  (immutabilità del termine cinetico tra sezioni di pari diametro nel tratto interessato).

La quota geometrica  $z_b$  (m) del baricentro della condotta può interpretarsi come un'energia di posizione per unità di peso (moltiplicandola per un peso, se ne ottiene un'energia potenziale), mentre l'altezza piezometrica  $p/\gamma$  (m), con  $\gamma$  (N/m<sup>3</sup>) peso per unità di volume, come un'energia di pressione dovuta all'affondamento del filetto fluido, per cui posseduta dall'unità di liquido sottoposta alla pressione  $p$  (N/m<sup>2</sup>) nel baricentro medesimo.

La pressione  $p$  in sé non risulta una grandezza limitante, se non nel merito della resistenza della condotta adottata da caso a caso; ciò che invece ha rilievo ai fini del moto è la variazione di pressione  $\Delta p$  tra due punti, quale differenza tra linea piezometrica, luogo dei punti situati a quota  $z_b + p/\gamma$ , e traiettorie dei filetti fluidi, mediamente coincidenti con  $z_b$  stessa;  $z_b + p/\gamma$  deve linearmente variare per punti appartenenti a sezioni differenti.

Più in particolare, il moto della corrente viene generato da un gradiente negativo del carico, da sezioni con carico maggiore verso sezioni con carico minore, ovvero da  $\sigma_1$  verso  $\sigma_2$  per carico totale  $H_1 > H_2 = H_1 - \Delta H$ , con  $\Delta H$  perdita di carico di tipo distribuito, fornita dall'abbassamento della piezometrica, che, a meno delle perdite concentrate raffigurate dell'entità dal termine cinetico  $v^2/2g$  (ove  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> rappresenta l'accelerazione di gravità) tende alla coincidenza con la linea dei carichi idraulici (per condotta lunga, infatti, l'aliquota concentrata, in sé dell'ordine del 5%, si rivela decisamente trascurabile; viceversa, quella distribuita individua il 95% del totale).

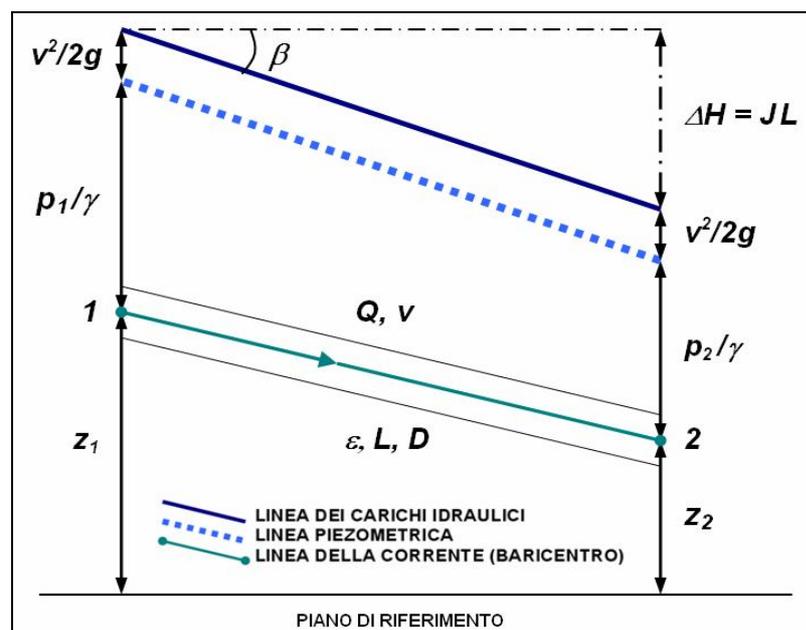


Fig. 3.8 - Andamento della piezometrica e linea dei carichi idraulici in regime uniforme e stazionario.

Ponendo  $z_1 = z_2$  (ipotesi di condotte orizzontali ad effetto del carattere fortemente pianeggiante delle superfici annessi all'area in studio), semplicemente si ha:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \Delta H = J \cdot L \quad (3.19)$$

Tale perdita può individuarsi in ragione del coefficiente di attrito  $\beta$ , tenente conto delle caratteristiche del materiale di cui viene a costituirsi il condotto (altresì della sua scabrezza) e, più in dettaglio, attraverso formulazioni di tipo empirico o sperimentale che, nella forma più generale e comunemente adottata, si riconducono all'espressione di Darcy-Weisbach (1857):

$$J = \frac{f \cdot v^2}{2g \cdot D} \quad (3.20)$$

$f$  è un coefficiente adimensionale di resistenza, includente diversità comportamentali legate ai diversi regimi di moto, oltre che alla natura del liquido e del contorno; pertanto, esso dipende dalla scabrezza relativa  $\varepsilon/D$  del condotto e dal numero di Reynolds  $Re$  (1883), in funzione della viscosità cinematica del fluido  $\nu$  ( $m^2/s$ ),  $v$  e  $D$ . Per la determinazione del fattore di attrito può indifferentemente operarsi da abaco (Moody, 1944) o in via analitica, pervenendo alla convergenza in prossimità del valore che renda identici (scarto nullo) primo e secondo membro della relazione di Colebrook-White (1937), una legge di resistenza implicita in moto "turbolento di transizione" MTT (soluzione iterativa):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon / D}{3,71} \right) \quad (3.21)$$

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (3.22)$$

Rispetto al caso completo che in SIMODIS tiene conto di ambedue le quantità in parentesi, le due estremità vengono figurate dalle condizioni di "tubo liscio" MTL (ad  $\varepsilon$  nulla, funzione del solo  $Re$ ) e di "assoluta turbolenza" MAT (per velocità elevate, in prevalenza del termine  $\varepsilon/D$ ); ne derivano forte instabilità, completa perdita di parallelismo da parte dei filetti fluidi nei confronti del bordo della condotta ed evidenti scambi di massa tra le regioni del campo; viceversa, la contingenza di moto "laminare" (per velocità ovvero  $Re$  particolarmente ridotti), in assenza di scambi di massa e stessi filetti fluidi paralleli alle pareti del contorno, viene pienamente raggiunta per impianti a goccia. Il coefficiente di attrito assume una forma lineare del tipo:

$$f = 64 / Re \quad (3.23)$$



#### **4.1 La Piana del Sele: presentazione generale dell'area di indagine**

La Piana del Sele rappresenta la più vasta area pianeggiante dell'intera Provincia di Salerno, una distesa geologicamente giovane, formatasi in seguito alla deposizione di materiale alluvionale proveniente dalle alture retrostanti da parte di numerosi corsi d'acqua, del Sele in particolare, dando origine alla presenza di terreni fertili e profondi, ad elevata capacità di utilizzo.

L'altimetria media oscilla intorno ai 30 m s.l.m. fino a quote di 100 m s.l.m. ad immediato contatto con i rilievi Picentini (porzione orientale); la superficie digrada poi verso ovest, con un lieve gradiente di pendenza e brevi salti morfologici volti a raggiungere livelli costieri. L'aspetto generale si rivela dolcemente ondulato, con concavi ed ampi paleoalvei (vallette) e profonde incisioni torrentizie trasversali e in direzione del mare, tipicamente intervallate e delimitate da terrazzamenti subpianeggianti e scarpate; recenti cordoni dunari segnano il passaggio alla spiaggia attuale, confine occidentale dell'intera area; la fascia retrostante agli stessi cordoni, ricoperta da pineta per le imperfette condizioni del drenaggio, mantiene una parvenza estensiva con diffusione del pascolo bufalino.

Il clima risulta essere quello caratteristico delle zone mediterranee: estati aride, alternate ad inverni temperati e piovosi; la stessa piovosità viene particolarmente concentrarsi nei mesi di novembre, dicembre e gennaio. La temperatura è mite, influenzata dalla latitudine, dall'altitudine e dall'adiacenza al mare, in presenza di escursioni termiche limitate; la media annua può verosimilmente attestarsi intorno ai 17 °C, mentre quella mensile delle temperature massime lambisce di rado i 30 °C (Brancaccio et al., 1987).

Clima e morfologia (struttura pedologica in particolare: substrato, natura del materiale parentale, tipicità/proprietà dei suoli, ecc.), vicendevolmente influenzandosi, determinano qualità e quantità delle risorse fornite all'ecosistema, incidendo sull'ambiente circostante, quale sintesi di azioni/condizioni atte a sostenere ciclicità biologiche, organismi e forme di vita (flora e/o fauna) alle diverse scale; al tempo stesso, interventi antropici in genere possono indurre profonde modificazioni nel mondo rurale, alterando in positivo o in negativo il complesso di interazioni alla base dei processi intervenenti o agenti nel continuum suolo-pianta-atmosfera.

Dagli inizi del XIX secolo alla metà degli anni '50, l'intero territorio (500 km<sup>2</sup>) è stato sottoposto a consistenti interventi di bonifica, seguiti dalla realizzazione dei primi impianti collettivi al servizio di aree più o meno sviluppate; i successivi decenni sono stati decisamente caratterizzati da un'intensa attività di rimodernamento e ripristino dei preesistenti elementi (opere e reti di

canali a pelo libero), mirando, in definitiva, alla diffusione e al progressivo potenziamento delle odierne tecnologie/tipologie di distribuzione irrigua (sistemi pressurizzati).

Ad un passato ampiamente caratterizzato dall'estensione dominante delle piantagioni di tabacco, l'impronta odierna contrappone una maggior presenza di colture ortive (anguria e piantagioni di pomodoro in particolare) o erbacee (mais tra tutte), servite da tipologie irrigue ad asperzione o a pioggia; a queste si aggiungono diverse arboree da frutto (pero, pesco, albicocco, ecc.), per le quali l'irrigazione a goccia può raggiungere livelli eccezionalmente elevati (in alcuni casi, oltre il 45% della superficie irrigata).

Quanto esposto risulterebbe integralmente confermato da recenti studi riguardo alterazioni e adattamento dell'agricoltura in destra della Piana (225 km<sup>2</sup>) al cambiamento climatico e stessa biodiversità delle specie coltivate a valore aggiunto (specificità rilevante produttiva), studi affiancati dall'impiego di immagini telerilevate e dalla realizzazione di carte tematiche ad una scala spaziale più ampia (De Lorenzi et al., 2011).

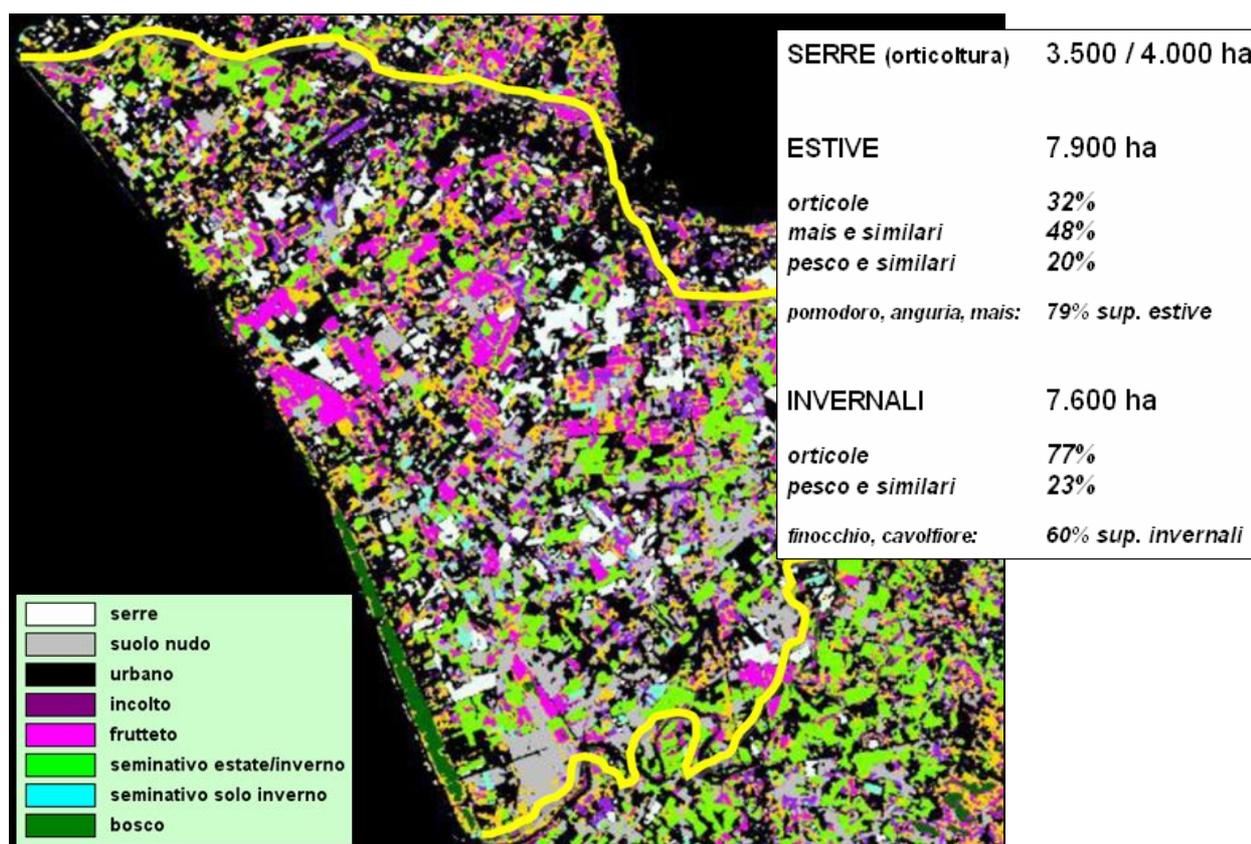


Fig. 4.1 - Mappa di uso del suolo in Destra Sele (2006) per oltre 16.000 ha irrigabili.

Al di là della descrizione di carattere generale fin qui effettuata, ai fini investigativi, ci si è rivolti all'eventualità di dirigere l'intera riflessione verso l'impianto irriguo "Boscariello", eletto quale "SIMODIS Area Test" per stagioni irrigue 2007/2008, ricadente interamente al perimetro del Consorzio di Bonifica Destra Sele (Eboli, Salerno).

#### 4.2 Il Comprensorio del Destra Sele: suddivisione e compiti del Consorzio di Bonifica

Allo stato attuale, l'area del Comprensorio in destra del Fiume Sele è stata ampliata ad oltre 70.000 ha, comprendendo la fascia costiera (dalla zona industriale di Salerno alla foce medesima del Sele) e la zona interna "pedemontana e montana" nei Comuni di Salerno (lato sud), Pontecagnano-Faiano, Bellizzi, Battipaglia, Eboli e Montecorvino Pugliano, tutt'oggi costituenti la componente storica dell'Ente (perimetrata in azzurro), e nei Comuni di Castiglione dei Genovesi, San Cipriano Picentino, San Mango Piemonte, Giffoni Valle Piana, Giffoni Sei Casali, Acerno, Montecorvino Rovella, Olevano sul Tusciano, Campagna e Contursi Terme, di acquisizione 2003, più altra parte e/o quanto interamente ne resta dei Comuni poc'anzi citati (raffigurata in verde).

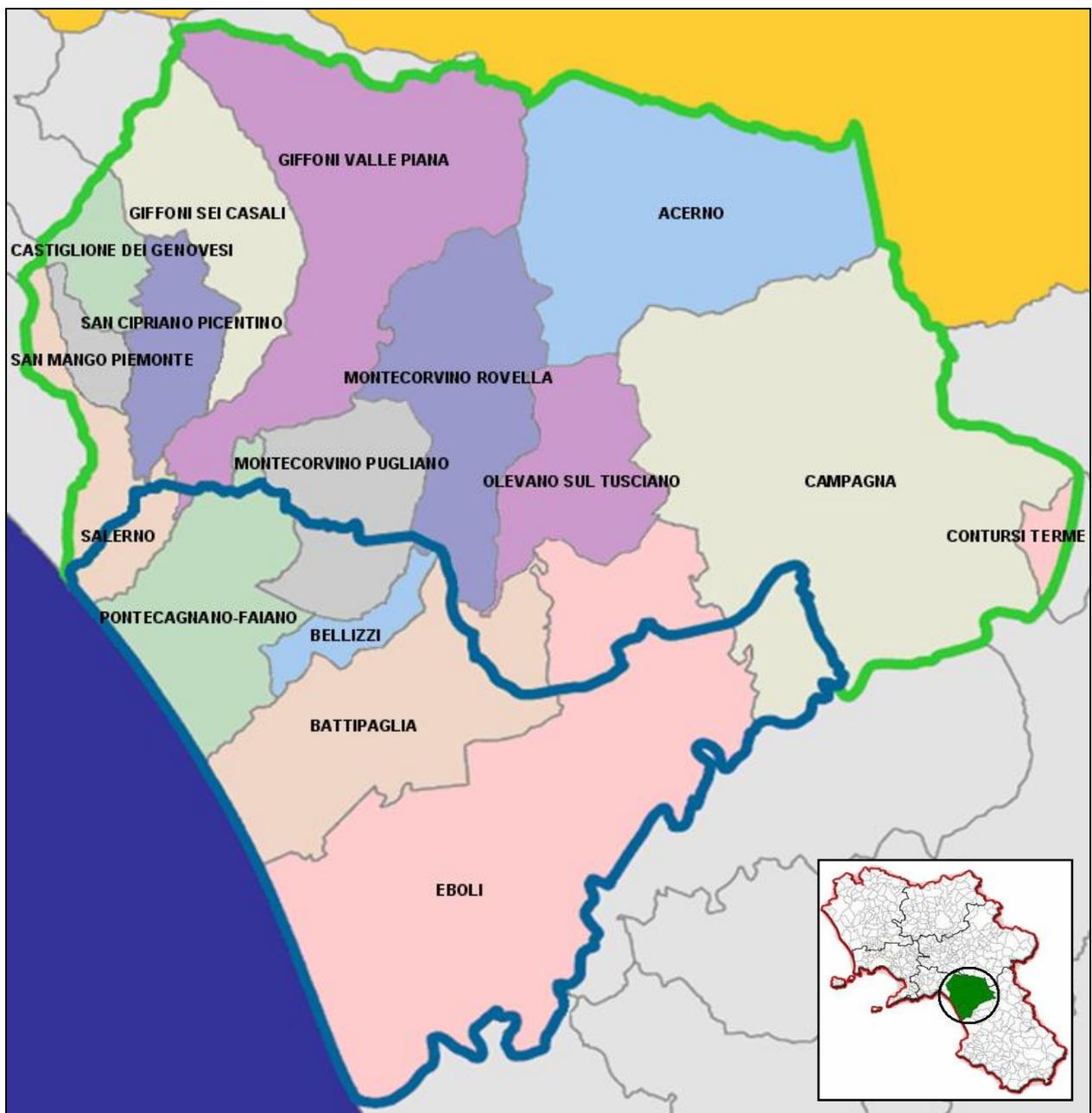


Fig. 4.2 - Consorzio di Bonifica Destra Sele: limiti comprensoriali e Comuni coinvolti.

All'interno del nucleo storico del Consorzio, ricoprente un'estensione di 22.500 ha (di cui 5.000 ha compresi in "aree di non suolo", ovvero urbane, industriali, cave, ecc.), vi risultano ubicate in maniera capillare numerosissime infrastrutture di bonifica, per le quali, salvo tratti tombinati di ambito prettamente urbano, vengono curati interventi di manutenzione annuale, straordinaria, pluriennale e/o secondo necessità, attività di conservazione delle opere e delle pertinenze, azioni di presidio idraulico e di protezione civile in caso di piena, esondazioni o emergenze meteorologiche; a completamento di ciò, il Consorzio progetta ed esegue opere di ristrutturazione o ammodernamento delle reti irrigua e drenante su finanziamenti comunitari, statali e regionali.

Il vigente Piano di Classifica si basa sulla particolare attribuzione della spesa consortile per centri di costo, direttamente o indirettamente imputabili alla funzione operativa; tali voci di spesa risultano anzitutto legate al duplice quanto essenziale ruolo svolto dall'Ente in materia di bonifica e irrigazione, con quest'ultima, in primo luogo sotto l'aspetto del risparmio idrico quale specifico elemento di attrazione e di riflessione, assolutamente designata a rappresentare il principale oggetto del seguente studio.

#### **4.2.1 Sistemi di irrigazione presenti ed opere in gestione**

Con discreta approssimazione, la parte destinata alla sola componente irrigua include circa 15.000 ha a ruolo degli oltre 16.000 ha irrigabili complessivi; il sistema si basa principalmente su due fonti di approvvigionamento:

- Fiume Sele per 13.077 ha, di cui 1.840 ha con rete di canali a pelo libero ed 11.237 ha con rete tubata in pressione, da ripartirsi tra gli impianti Boscarello (circa 2.000 ha), Castrullo Nuovo (1.448 ha), IV / V Lotto (934 ha), Zona Bassa (4.088 ha) / Prima Sezione (1.400 ha) e Fascia Litoranea (1.367 ha), per un totale di n. 5 Macro Bacini;

- Fiume Tusciano per 1.890 ha, con rete di canali a pelo libero (Macro Bacino Zona).

L'esercizio originario figurava come un sistema turnato di 24 ore su 24. Negli anni, però, i cambiamenti del mondo rurale ad opera delle nuove conoscenze nel settore agrario, la considerevole spinta tecnologica e la radicale evoluzione del contesto socio-economico hanno determinato l'inutilizzo dell'acqua distribuita ai consorziati nelle ore notturne da parte di numerose aziende e indotto l'Ente a programmare e riprogettare l'ammodernamento dell'intero complesso; la ristrutturazione ha comportato la sostituzione della preesistente rete a pelo libero con reti tubate per oltre il 65% della superficie indicata, alle quali è risultato essere gradatamente e più correttamente associato l'odierno funzionamento a 16 ore.

Tra le opere attualmente in gestione è possibile annoverare:

- n. 11 impianti di sollevamento irriguo (per complessivi 8.500 l/s): Asa, Boscariello, Bacino Nord, Bacino Sud, Campo Eminente, Campolongo, Castrullo, Corno D'Oro (Vasca A + Vasca IV Lotto e V Lotto), Padula Grande, Piopparelle, Vasca D:

- traversa fluviale di Persano sul Fiume Sele con invaso (8.586 l/s);
- traversa fluviale Fiumillo sul Fiume Tusciano (1.000 l/s);
- canale principale di irrigazione (22.000 m);
- canali derivatori a pelo libero (77.296 m);
- rete terziaria a canalette (100.000 m);
- rete tubata (719.437 m).

Il corpo idrico derivato si ripartisce in canali a pelo libero (con moduli da 30 l/s) e moderna rete tubata, allestita per le diverse tipologie di consegna (10-20-30 l/s), anzitutto in relazione all'entità dei singoli areali serviti.

Nei settori a pelo libero del subcomprensorio Sele/Tusciano la distribuzione irrigua avviene in base a turni predisposti ed attuati dal Consorzio tra le aziende agricole ricadenti all'interno di unità comiziali, estese mediamente 60 ha; la turnazione si effettua in ragione della superficie irrigabile con intervallo di adacquata di circa 9 giorni nel subcomprensorio Sele e di 7 nel caso del Tusciano; di contro, nei settori attrezzati di rete tubata la ripartizione viene eseguita con sistema alla domanda (o a richiesta) nell'ambito di unità di dimensione pressoché variabile tra 5 e 30 ha, dotate di n. 6 utenze in media.

#### **4.2.2 Influenza del telecontrollo e politiche di risparmio energetico/idrico**

Per il solo impianto Boscariello, un moderno apparato di "telecontrollo" ad elevata potenza ed automazione è entrato in funzione nel 2003, interessando un'estensione di oltre 1.700 ha (dei circa 2.000 ha complessivi). L'installazione nel centro di Aversana, ove già risulta da tempo operante un secondo e meno odierno sistema per la gestione di n. 3 idrovori e di altri impianti di sollevamento, favorisce il diretto pompaggio in rete, modalità di esercizio decisamente più sofisticata rispetto a quella classica con alimentazione mediante bacino di accumulo in quota.

Numerosi accorgimenti tecnologici soddisfano nell'insieme le esigenze e le aspettative del Consorzio, che in futuro prevede di collegare al dispositivo nuove opere in corso di realizzazione, allo scopo principale di ottimizzare i processi ed abbattere i costi in genere (idrici ed energe-

tici), contenere sprechi e risorse umane e sostenere, oltre alla programmazione, l'intervento degli stessi addetti alla gestione e alla manutenzione delle singole opere; come a più riprese osservato, acquisire la completa tracciabilità del flusso di informazioni (totalità delle operazioni svolte internamente al sistema) può consentire di compiere analisi funzionali e specifiche (individuazione di trend storici, stima e considerazione dei valori sensibili, ecc.), rivolte ad accompagnare la gestione degli allarmi e la sicurezza globale, o comunque a svelare moderni approcci nel pensare al problema nel tempo e nello spazio, largamente incoraggiando il desiderio di esplorazione e scoperta da parte del decisore medesimo.



Fig. 4.3 - Impianto irriguo del Boscariello: vasca di accumulo e sala macchine.

Il Consorzio ha di recente progettato impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili, di fatto già realizzandone alcuni: idroelettrici, fotovoltaici e da biomasse vegetali liquide (oli di soia, girasole, palma e colza), con questi ultimi allo scopo di ridurre i costi energetici delle stazioni irrigue site rispettivamente in località Castrullo e Boscariello; come noto, simili impianti comportano emissioni nulle di anidride carbonica ed un notevole rispetto per l'ambiente; sviluppando 650 kW di potenza il primo e 1.000 kW il secondo, indurrebbero alla produzione di 13 milioni di kWh annui, quantitativo paragonabile al consumo di un intero complesso industriale, una frazione importante dell'energia abitualmente impiegata in tale ambito.

Accanto alle politiche segnalate di sviluppo/contenimento energetico, si colloca sopra ogni cosa l'aspetto correlato al risparmio idrico: la "Nicotra Sistemi s.p.a.", da anni azienda leader nel settore, si è fatta ideatrice, brevettatrice e promotrice del sistema automatizzato "AcquaCard" per la distribuzione regolamentata dell'acqua ai consorziati attraverso tessere elettroniche di prelievo, dette "AcquaMob/AcquaPass", al fine di coinvolgere e responsabilizzare le stesse utenze nel vitale processo di razionalizzazione delle risorse; sebbene il criterio attuale di tariffazione risulti ancora legato alla superficie impegnata più che ai consumi effettivi, in futuro, all'interno del Bo-

scariello e non, la presenza dei gruppi di consegna dovrebbe prontamente assicurare il riscontro e l'addebito dei soli volumi realmente transitati all'attivazione del flusso idrico, previo inserimento tessera medesima; disponibili per diversi diametri a seconda delle modalità di ripartizione e impiego (DN50, DN80, DN100, ecc.), singoli gruppi di consegna, che in gergo AcquaCard prendono la denominazione "AcquaFix", rappresentano unità elettroniche interamente avulse e/o scollegate da altre, specificamente dotate di microprocessore proprio, idrometro con limitatore di portata integrato, idrovalvola a corpo ellittico, con contatore volumetrico a mulinello, ed elettrovalvola bistabile (a separazione di fluido), con comando manuale e circuito idraulico protetto da filtro a dito e/o ad Y (a cartuccia rimovibile). AcquaFix accetta solo AcquaMob in rispondenza e in conformità delle quali risulta essere abilitato, contrariamente alle tessere AcquaPass, esclusivamente in gestione all'Ente, atte a garantire accesso indistinto da parte degli operatori/addetti ai gruppi della rete distributiva, convenendo perfino di turnare la ripartizione (in alcuni giorni o periodi dell'anno, in accordo con la programmazione attuata) qualora un'imprevista carenza idrica non potesse rendere sostenibile il completo assolvimento della domanda.

Ad oggi, in tutt'Italia, oltre 60.000 utenti prelevano da 35.000 gruppi di consegna AcquaFix avvalendosi della tecnologia del sistema AcquaCard, che permette di:

- assegnare a ciascuna azienda quantitativi d'acqua irrigua prepagati, dunque prefissati;
- stabilire un tetto massimo, in volume e/o in tempo, per ciascun intervento irriguo; nel rispetto e nell'ambito di tali limiti l'utente può variarne a piacimento il valore;
- programmare orari e turni di prelievo: l'arresto del flusso idrico risulta ottenibile inserendo nuovamente AcquaMob in predetta sede, o finanche in automatico (per tempo massimo previsto oppure impostato) dal momento che sia stato preventivamente modificato e ridotto;
- memorizzare cronologicamente singole operazioni di prelievo (giorno/mese/anno, durata del flusso, volume transitato alla portata costante, anch'essa prefissata);
- consentire sempre l'installazione su reti irrigue preesistenti grazie alla semplicità di allaccio ed autonomia stimata in un minimo di 10 anni per ciascuna unità (le componenti elettroniche di sistema risultano perfettamente funzionanti nel range di temperatura - 20 / + 70 °C);
- implementare connessioni opzionali con il Centro di Gestione, via GSM/GPRS o radio ed evitare che l'utente debba obbligatoriamente recarsi presso uffici consortili per operazioni di routine relative alla tessera elettronica: lettura e scarico dello storico dei prelievi e modifica dei parametri, inclusa ovviamente la ricarica della dotazione idrica, possono eseguirsi direttamente via USB dal proprio PC, se dotato di interfaccia "AcquaCoon".

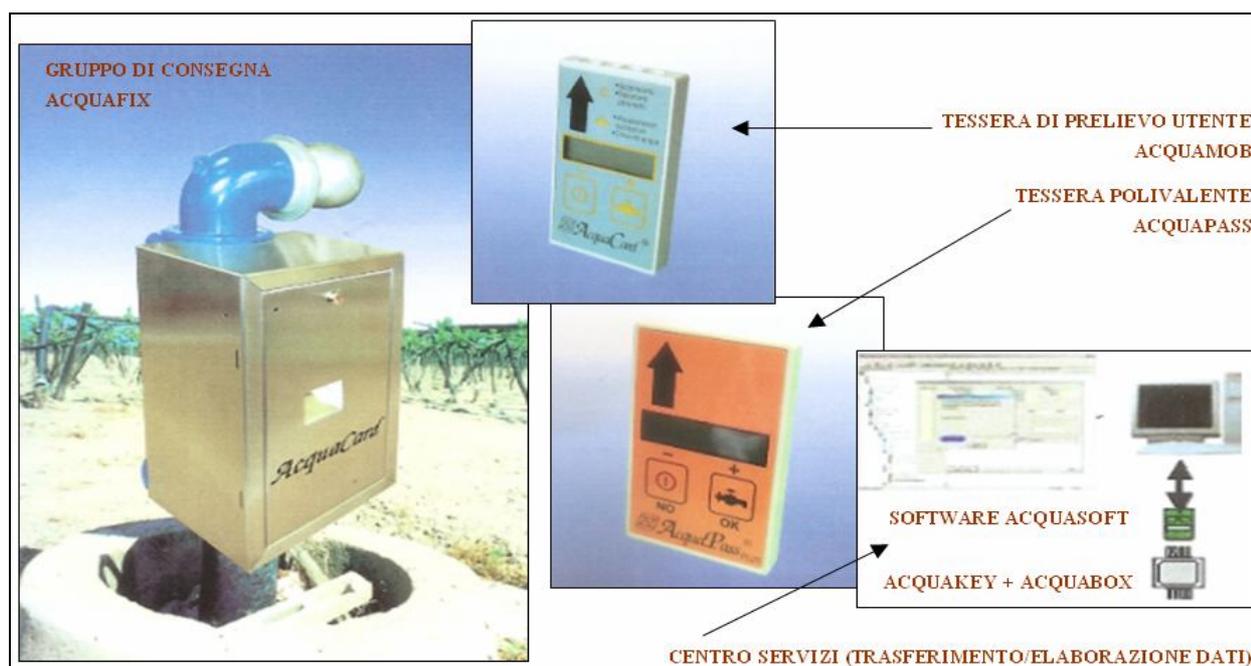


Fig. 4.4 - Sistema automatizzato AcquaCard per la distribuzione regolamentata dell'acqua alle utenze.

All'Ente operante si demandano unicamente compiti e/o interventi di management, controllo e download, attraverso piattaforma "AcquaKey" e software gestionale "AcquaSoft" previsti in dotazione, e la periodica attivazione delle tessere di prelievo nei riguardi delle singole utenze, oltre ad inderogabili funzioni di manutenzione; eventuali rotture di componenti elettroniche, o, più semplicemente, il possibile/periodico intasamento di filtri o parti meccaniche potrebbero causare l'interruzione del gettito di informazioni, con parziale/totale perdita di memoria e consequenziale assenza dei dati di consumo annessi.

### 4.3 L'impianto del Boscariello: segmentazione e subsistemi presenti

Al di là degli aspetti di carattere puramente tecnologico-gestionale riguardanti la scelta del Boscariello, preferito in primo luogo per ragioni correlate alla frequenza e disponibilità di dati ed acquisizioni, risulta opportuno precisare come, da un punto di vista strettamente spaziale e geometrico, lo stesso impianto venga a suddividersi in n. 3 sottozone, definite reparti o unità primarie alla scala distrettuale. A ciascuna di esse sarà stato assegnato un codice "i", pari a 2 per reparto Sud, 3 per Fiocche, 4 per Rosale; l'assenza del codice  $i = 1$  risiede tutta nella dovuta estromissione del settore Nord, in presenza di problematiche accessorie legate ad informazioni di uso del suolo e al mancato possesso di alcuni attributi riguardanti la rete di condotte in pressione; la forte compartecipazione di ambienti serra in tale reparto (non favoriscono l'apporto del telerilevamento per l'identificazione delle colture coinvolte) e, accanto ad essa, le ridotte dimensioni delle pertinenze servite hanno ancor più accreditato e sorretto una simile valutazione e quindi eccezione.

Dal punto di vista idraulico l'esclusione del distretto è stata resa possibile dalla sconnessione generata immediatamente a valle della vasca di accumulo, da cui si dipartono condotte primarie differenti volte alla distribuzione in subsistemi separati, di dimensione visibilmente distinta:

- subsistema (1): designato al rifornimento idrico del solo distretto Nord (208 ha)
- subsistema (2): anteposto all'alimentazione dei restanti reparti di impianto: Sud (302 ha), Fiocche (588 ha) e Rosale (292 ha), per un'estensione complessiva di 1.182 ha.

Le superfici indicate sono da intendersi quali già depurate da strade e sterrati, spazi incolti, aree edificate o riservate alla collocazione degli impianti, stessi ambienti serra per quanto precisato e medie aree boschive in prossimità del Sele, anch'esse reputate quali non irrigabili; appare evidente come parte del volume di risorsa disponibile risulti da destinarsi ad altri ambiti o settori (da attribuirsi ad usi/mansioni alternative, senz'altro minoritarie all'apparenza, ma non integralmente trascurabili); questa percentuale potrebbe oscillare tra il 10 e il 15% dalla richiesta giornaliera, in rispondenza alla terza parte della superficie sorretta dall'apparato di telecontrollo.

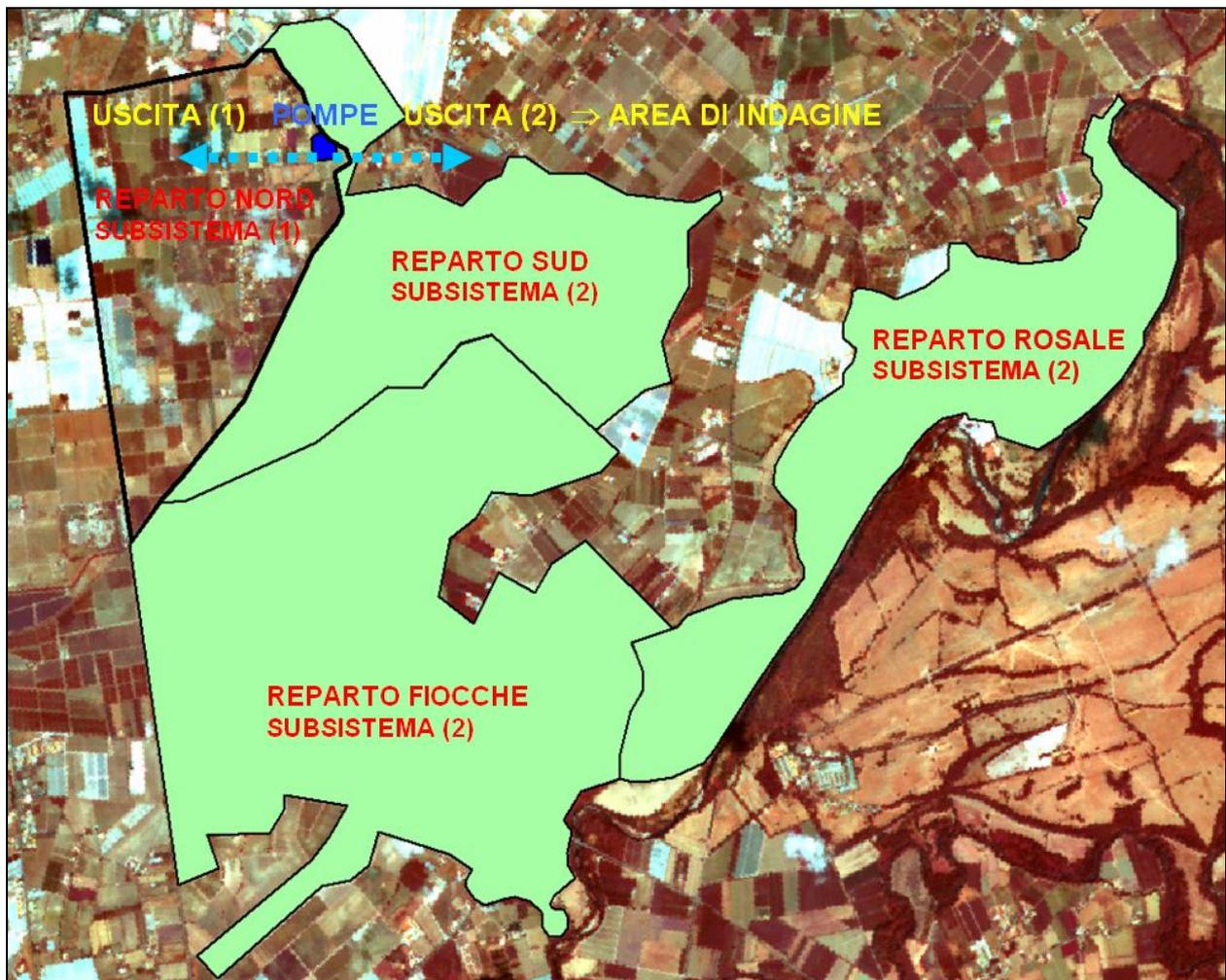


Fig. 4.5 - Aspetto e suddivisione dell'area indagine (fondo in falsi colori; immagine Spot 5, 29/08/2008).

Nel merito delle considerazioni successivamente effettuate, come per l'esame individuale di determinati elementi o aspetti riguardanti informazioni distintamente raccolte nei confronti dell'area indagata (elaborazioni ArcView GIS), si raccomanda di prendere apposita ed accurata visione delle tavole situate in appendice C.

### 4.3.1 Natura e geometria della rete distributiva

Ai fini della comprensione dei singoli ragionamenti ammessi alla scala "medio-piccola" associata all'ambito in proposito, può anzitutto rendersi utile illustrare alcuni aspetti che ne descrivono la particolare natura strutturale.

La seguente considerazione riguarda la scala aziendale (interna ai distretti), tipico sottoinsieme della sfera settoriale di cui si compone l'intero complesso, e quella locale, scaturente dalla suddivisione della prima: all'interno dei rispettivi reparti "i", ad ogni gruppo di consegna vengono a riferirsi altrettante unità secondarie "j" (definite anche comizi qualora la consegna venga regolata da più utenti) mentre, al livello ancora inferiore, ciascun AcquaFix appare propriamente e comunemente posto alla testa di una o più unità terziarie "k".

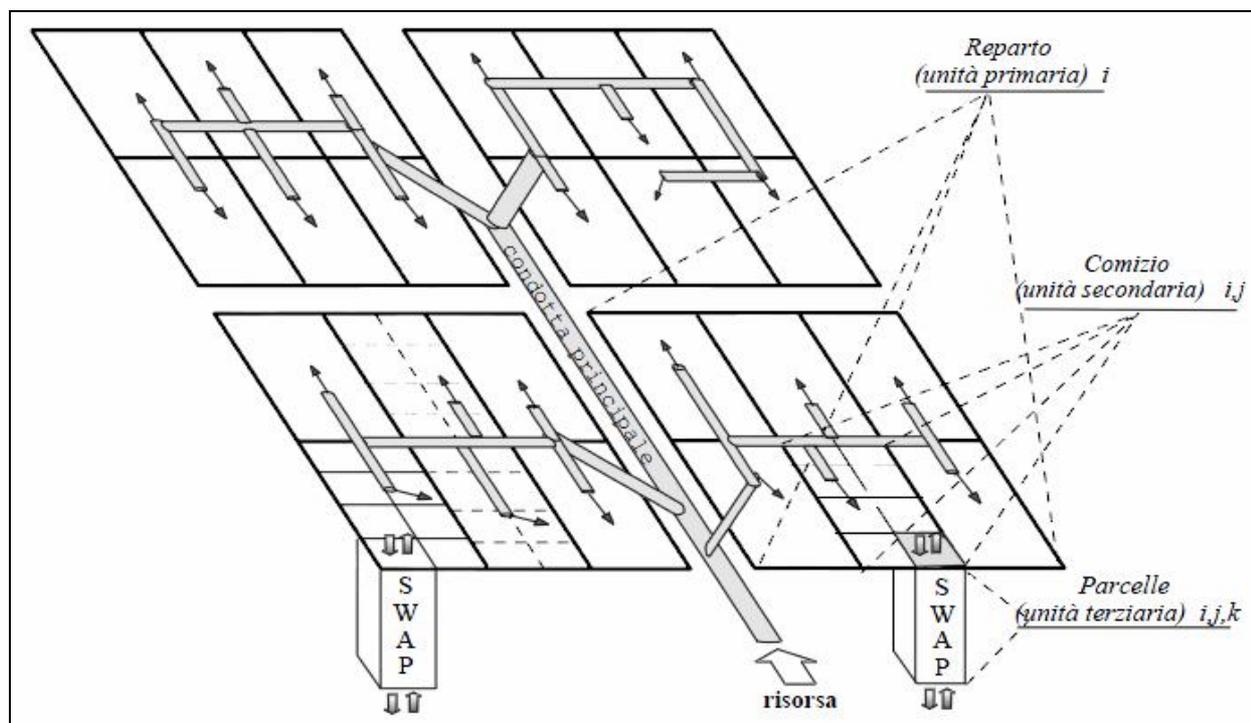


Fig. 4.6 - Schema di condotte in pressione e modellizzazione gerarchica del DSS irriguo alla domanda.

Un siffatto sistema gerarchico agevola l'univoca individuazione spaziale di siti specifici alla scala locale (parcelle irrigue) tramite semplice attribuzione/riconoscimento della triade "i-j-k".

In riferimento al solo subsistema (2), si è resa necessaria l'acquisizione dei parametri e delle specifiche attinenti alla rete di distribuzione in pressione: materiali, lunghezza e diametri delle

condotte primarie e secondarie; si è dispensato unicamente dall'apprendimento delle quote geometriche inerenti l'area in studio, dal carattere fortemente pianeggiante, e dei requisiti riguardanti la rete terziaria, non richiesti internamente al modello, nell'ipotesi di funzionamento simultaneo per unità appartenenti alla medesima area di influenza  $j$ -esima.

In SIMODIS, il totale pervenuto all'idrante  $j$  viene a suddividersi esclusivamente in dipendenza del fabbisogno giornaliero (da bilancio idrologico) delle unità terziari  $k$  site al suo interno, prescindendo dalla particolare conformazione in rete dei tratti associati a tale livello.

TIPO CONDOTTE	scabrezza (mm)	lunghezza totale (m)	diametri condotte primarie e secondarie (mm)
primarie (acciaio)	0,15	11.000	400, 500, 600, 800, 1.000, 1.400
secondarie (PVC)	0,03	49.400	110, 140, 160, 180, 200, 250, 315, 400, 500

Tab. 4.1 - Specifiche della rete distributiva: materiali, lunghezza complessiva tratti e diametri intervenuti.

#### 4.3.2 Misure di prelievo effettivo e definizione dei principali parametri di impianto

Al lieve ritardo di carattere esplicitamente amministrativo e burocratico accumulato in fase di adesione e tesseramento da parte degli stessi utenti, non ha potuto di certo sottrarsi la naturale decelerazione riguardo l'entrata a regime del sistema Acquacard per distinte porzioni del Boscariello e non; nel caso specifico, il fenomeno ha riguardato numerose proprietà (alcune sottozone dei reparti Nord e Fioche ne sono state particolarmente colpite), inversamente da quanto avvenuto in Castrullo ad esempio, dove, allo stato attuale, oltre il 60% delle unità AquaFix installate ed ordinariamente mantenute dal Consorzio risulta pienamente funzionante e correttamente abilitato al rilevamento dei consumi idrici.

Per entrambe le stagioni oggetto di analisi, alla parziale conoscenza del dato di prelievo effettivo riconducibile alle utenze del Boscariello, mediamente pari al 10% delle unità complessive, ma anche al 15% della superficie irrigabile (per lo più trattandosi di ampi areali), si contrapposto un secondo e più prezioso elemento: il dato attinente all'acquisizione dell'informazione sul volume di risorsa disponibile giornaliera, di oltre 90.000 m<sup>3</sup> se riferito ai complessivi 2.000 ha di impianto, ovvero  $V_{RES} = 55.000 \text{ m}^3$ , in relazione alla sola superficie indagata  $S_{tot} = 1.182 \text{ ha}$ , alla portata diurna  $Q_{16} = 940 \text{ l/s}$  (0,94 m<sup>3</sup>/s).

La capienza del bacino di accumulo a monte delle pompe e dei reparti Nord e Sud (da non confondersi col volume di risorsa idrica di cui si complessivamente dispone), è risultata attestarsi lievemente al di sopra dei 40.000 m<sup>3</sup>, per un'entrata costante a 24 ore (previsti circa due riempimenti giornalieri in media). Segue, infine, il dato relativo al carico  $\hat{H} = 70 \text{ m}$  alla testa di entrambi i sottosistemi (e del (2) in particolar modo); alla consegna risulta invece garantito un carico minimo di 4 bar e, pertanto:  $H_{min} = 40 \text{ m}$ .

### **4.3.3 Tipologia ed attribuzione dei gruppi di consegna in funzione delle pertinenze**

Un apposito sistema informatizzato GIS, a più livelli intersecantisi o sovrapponibili per una più pronta quanto diretta associazione tra le distinte tipologie di dati impegnati, raccoglie informazioni di articolata e differente natura, dal carattere irriguo o meno delle aree facenti parte del complesso in esame, al merito della suddivisione delle singole proprietà o aziende interessate, e, ancora, tutto quanto concerne forma, impegno spaziale (regioni di influenza) e specifica posizione delle unità AcquaFix diffusamente installate, secondo differenti categorie alla portata limite di 10 o 20 l/s in condizioni di flusso a regime costante, immediatamente raggiungibili (di fatto, vengono ad instaurarsi al momento esatto dell'attivazione medesima), oltre a ciò evidenziando come uno o più gruppi di consegna possano eccezionalmente provvedere al rifornimento idrico di unici e più estesi poderi o, al contrario, riferirsi ad associazioni/aggregazioni di pertinenze comprensibilmente adiacenti (due o più).

Alcuni idranti del tipo 10 l/s sono stati appositamente privati di limitatore di portata al fine di servire areali di media estensione, da 4 a 6 ha, maggiore di quella abitualmente prevista per la classe (fino a 3 ha); riguardo a tali eccezioni è stato opportunamente stimato e associato un valore di portata limite di 13 l/s. La tipologia da 20 l/s risulta invece essere adibita al servizio di aree ancor più estese, di superficie mediamente variabile da 12 a 20 ha.

### **4.4 Caratterizzazione del sistema suolo-pianta-atmosfera**

Con esclusivo riferimento all'area in oggetto, è risultato evidente come, al di là delle caratteristiche e delle proprietà dei suoli indagati, ciascuna tipologia potesse includere orizzonti più o meno prossimi alla superficie, di spessore variabile (differenti dalla roccia o substrato sottostante) o, ancora, come la capacità di assorbimento da parte delle piante all'interno fosse condizionata da numerosi altri elementi: oltre che dal clima specifico dell'area medesima (pur rivelando una certa regolarità nel lungo periodo, mutamenti o alterazioni di breve termine, dal carattere stagionale, sono alla base dell'input di sistema), dalla stessa struttura/composizione e dalla predisposizione dei terreni ad essere coltivati e irrigati, dalla dimensione/profondità degli apparati radicali e, in conclusione, dalle fasi di crescita e sviluppo (livelli evapotraspirativi e fenologia delle piante altamente influenti nell'ambito dei processi esaminati).

Alla determinazione dei parametri/requisiti di carattere pedo-idrologico (par. 4.4.1) riguardanti le superfici prese singolarmente in esame (aree oggetto di calibrazione e studio), hanno fatto distintamente seguito ulteriori indagini/osservazioni di tipo agroambientale (par. 4.4.2) e climatologico (par. 4.4.3).

Fedelmente all'ordine illustrato, si riportano le fasi di definizione/produzione dati in input:

- identificazione delle unità pedologiche seguita dalla stima delle caratteristiche idrauliche dei suoli stessi: funzioni di ritenzione e conducibilità  $\theta(h)$  e  $k(h)$  per ciascun orizzonte di terreno;
- elaborazione e analisi di immagini telerilevate 2007/2008 (Landsat 5/7 TM, Spot 2, 4 e 5) per la distinzione delle colture (realizzazione di una mappa di uso del suolo), accanto alla determinazione dei parametri di sviluppo/evoluzione culturale  $k_c$ ,  $LAI$ ,  $s_c$ ;
- acquisizione dei principali parametri agrometeorologici alla scala giornaliera, con esplicito riferimento a misure di piovosità, oltre al valore dell'evapotraspirazione di riferimento  $ET_0$ .

Riguardo alla prima classe di dati, ci si è rivolti all'eventualità di poter assumere quale sito di calibrazione l'Azienda Agricola Sperimentale "Improsta", adiacente al Boscariello, ricoprente un'estensione di 135 ha in destra idrografica e in sinistra della SS18, per la quale si possedessero informazioni derivanti da precedenti campagne sperimentali (più estesa ed approfondita caratterizzazione ad una tale scala); queste avranno condotto al trasferimento all'area di indagine (scala spaziale più ampia) attraverso l'impiego dei metodi indiretti (PTF), come evidenziato in figura.

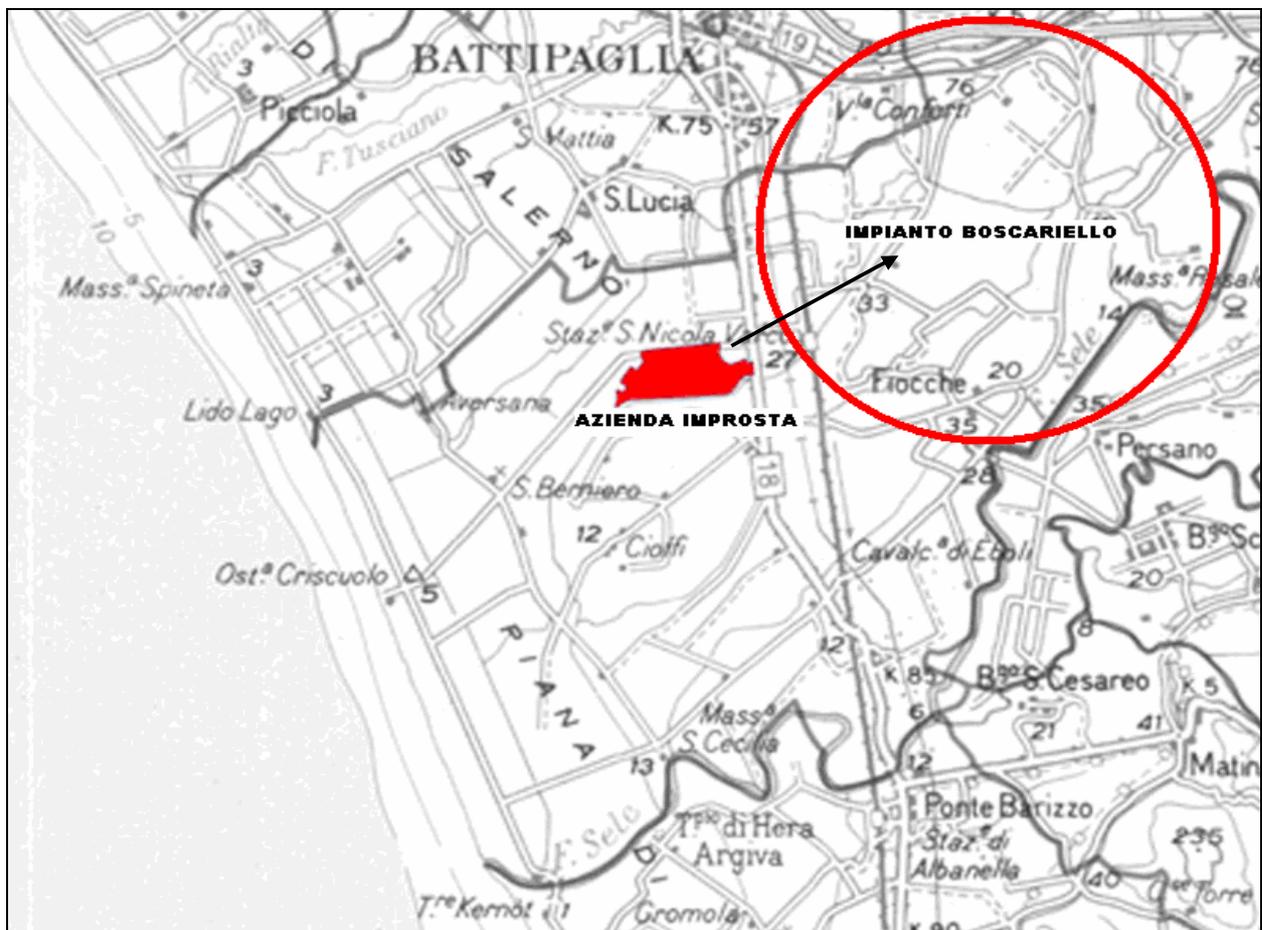


Fig. 4.7 - Posizionamento geografico delle aree rispettivamente oggetto di calibrazione e di indagine.

Al suo interno vi risulta altresì installata una moderna centralina, inserita nel recente PRCI (*Piano Regionale di Consulenza all'Irrigazione*), per l'apprendimento della terza classe di dati.

#### 4.4.1 Acquisizioni pedologiche annesse alle aree in studio ed oggetto di calibrazione

L'approccio iniziale ha previsto il coinvolgimento di un doppio data-set per distinti profili di terreno; la ridotta scala aziendale ha favorito la suddivisione in n. 11 unità cartografiche, con gli standard tipici di una rappresentazione 1 : 5.000 che evidenziano singoli corpi di suolo riconosciuti in campagna e circoscritti da linee continue. Implicando l'adozione di set di dati idrologici di precisione differente, in parte associati alle sopraindicate unità in Carta Suoli (Agristudio s.r.l., 2004) e in altra provenienti da una campagna di acquisizione sperimentale (D'Urso e Basile, 1997), l'analisi ha consentito il raffronto tra le semplici classi tessiturali del primo caso (su 35 profili di suolo), e le misure parametriche del secondo (per ulteriori 19 profili), oltre a ciò precisando come in tutti i casi osservati sia stata ammessa l'eventuale presenza di terreni dissimili fino al 15% del totale (entro intervalli specifici, in ragione del grado di purezza della stessa unità, possono sussistere lievi modificazioni rispetto al profilo rappresentativo).

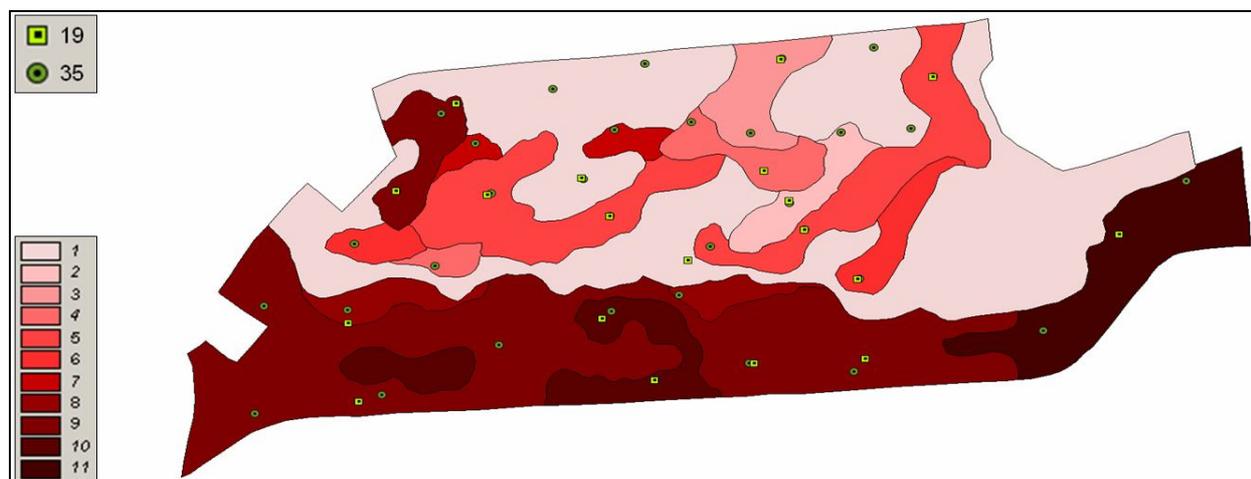


Fig. 4.8 - Pedologia dell'Azienda Improsta (2004) ed ubicazione dei profili inerenti a ciascuna classe.

Indistintamente dall'insieme di appartenenza, i profili sono stati realizzati in modo da ricoprire l'intera area, fino al livello del substrato inalterato o di falda, sito ad un massimo di 2 m di profondità dal piano campagna; a ciascuno di essi si è corrisposta una scheda tecnico-descrittiva relativa agli attributi del campione osservato, suddiviso a sua volta in orizzonti di spessore variabile, in funzione della natura e della stessa granulometria dei terreni lungo la verticale indagata.

Il passaggio dalla numerosità dei campioni investigati alla specificità delle unità pedologiche relative, attraverso un secondo step di spazializzazione (media parametrica, per punti esclusivamente appartenenti al medesimo insieme), ha permesso di minimizzare alcune discrepanze o

difformità inevitabilmente esistenti, sia all'interno delle singole serie illustrate che in conseguenza di un successivo e separato raffronto tra rispettive batterie di dati. Una siffatta operazione avrà avuto il vantaggio di poter spostare l'intera riflessione sul significato parametrico dei suoli e degli orizzonti partecipi, ma anche il senso di agevolare la verifica dello stato idrico dei terreni medesimi, restringendo il campo investigativo ad un numero inferiore di variabili.

L'apporto delle funzioni del pedo-trasferimento in relazione alla prima classe di dati ha definitivamente permesso di ricondurre le stesse due serie in esame sul medesimo livello informativo ed indotto ad una prima parametrizzazione idrologica alla scala aziendale, con riferimento a quelle basate su regressioni multiple di HYPRES (*HYdraulic P*roperties of *E*uropean *S*oils), generate a mezzo della banca dati suoli europei, e Vereecken; entrambe adottano attributi in ingresso già disponibili o agevolmente misurabili per orizzonti di suolo, quali granulometria dei suoli, densità apparente e, disgiuntamente per l'una o l'altra, contenuto di sostanza organica o carbonio organico (Wösten, 1999; Vereecken, 1988).

Complessivamente, 11 + 11 (da stime mediante impiego di PTF) + 11 (da misure sperimentali) esclusivi set parametrici per le rispettive unità UC esaminate lungo le relative verticali, con ognuno di essi formato da:  $\theta_{res}$  (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),  $\theta_{sat}$  (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),  $k_{sat}$  (cm/d),  $\alpha$  (cm<sup>-1</sup>),  $l$  ed  $n$ , cui si riferiscono contenuto idrico volumetrico (residuo e massimo) nel terreno, conducibilità idraulica alla saturazione e fattori di forma delle curve ad essi associate; ai fini applicativi saranno state necessariamente affiancate, in tutti i casi, stime di densità apparente  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>) e porosità  $\phi$  (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>).

$\theta_{res} = 0.015 + 0.005A + 0.014CO$ $\theta_{sat} = 0.81 - 0.283\rho + 0.001A$ $\alpha^* = -2.486 + 0.025S - 0.351CO - 2.617\rho - 0.023A \Rightarrow \alpha = \exp(\alpha^*)$ $n^* = 0.053 - 0.009S - 0.013A + 0.00015S^2 \Rightarrow n = \exp(n^*)$ <p style="text-align: center;">Vereecken <span style="margin-left: 100px;">A = % argilla; S = % sabbia; CO = % carbonio organico; <math>\rho</math> = densità apparente (g/cm<sup>3</sup>).</span></p> $\theta_{sat} = 0.7919 + 0.001691A - 0.29619\rho - 0.000001491L^2 + 0.0000821OM^2 + 0.02427A^{-1} + 0.01113L^{-1} + 0.01472\ln(L) - 0.0000733AOM - 0.000619\rho A - 0.001183\rho OM - 0.0001664L\text{topsoil}$ $k_{sat}^* = 7.755 + 0.0352L + 0.93\text{topsoil} - 0.967\rho^2 - 0.000484A^2 - 0.000322L^2 + 0.001L^{-1} - 0.0748OM^{-1} - 0.643\ln(L) - 0.01398\rho A - 0.1673\rho OM + 0.02986A\text{topsoil} - 0.03305L\text{topsoil} \Rightarrow k_{sat} = \exp(k_{sat}^*)$ $\alpha^* = -14.96 + 0.03135A + 0.0351L + 0.646OM + 15.29\rho - 0.192\text{topsoil} - 4.671\rho^2 - 0.000781A^2 - 0.00687OM^2 + 0.0449OM^{-1} + 0.0663\ln(L) + 0.1482\ln(OM) - 0.04546\rho L - 0.4852\rho OM + 0.00673A\text{topsoil} \Rightarrow \alpha = \exp(\alpha^*)$ $n^* = -25.23 - 0.02195A + 0.0074L - 0.194OM + 45.5\rho - 7.24\rho^2 + 0.0003658A^2 + 0.002885OM^2 - 12.81\rho^{-1} - 0.1524L^{-1} - 0.01958OM^{-1} - 0.2876\ln(L) - 0.0709\ln(OM) - 44.6\ln(\rho) - 0.02264\rho A + 0.0896\rho OM + 0.00718A\text{topsoil} \Rightarrow n = \exp(n^*) + 1$ $l^* = 0.0202 + 0.0006193A^2 - 0.001136OM^2 - 0.2316\ln(OM) - 0.03544\rho A + 0.00283\rho L + 0.0488\rho OM \Rightarrow l = 10 \frac{\exp(l^*) - 1}{\exp(l^*) + 1}$ <p style="text-align: center;">HYPRES <span style="margin-left: 100px;">A = % argilla; L = % limo; OM = % sostanza organica; <math>\rho</math> = densità apparente (g/cm<sup>3</sup>); topsoil = 1 per orizzonti superficiali; subsoil = 0 per orizzonti profondi.</span></p>
---

Fig. 4.9 - HYPRES e Vereecken: pedo-funzioni in parallelo.

Il criterio di valutazione inerente la selezione della PTF più affidabile/vantaggiosa potrebbe erigersi su un raffronto statistico tra stime e misure, tramite classici indici di errore, quali l'errore medio, lo scarto quadratico medio e quello quadratico medio standardizzato, con relativi coefficienti di correlazione; tuttavia, come nel caso della curva di ritenzione, più che alla coincidenza del dato di contenuto idrico in corrispondenza di un determinato potenziale, ci si potrebbe riferire al contenuto d'acqua dell'intero campo di esistenza e al confronto tra funzioni prodotte, potendo da ultimo ottenere una forma pressoché simile, ma più diretta per gli indici sopraindicati: l'errore medio relativo  $RME$ , la radice dell'errore quadratico medio  $RMSE$  e la radice dell'errore quadratico medio relativo  $RRMSE$  ( $E_i$  dato stimato,  $M_i$  valore misurato,  $M$  valore medio dati misurati):

$$RME = \frac{1}{n} \sum_n \frac{E_i - M_i}{M_i} \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_n (E_i - M_i)^2}{n}} \quad RRMSE = RMSE \frac{100}{M}$$

$RME$ , può comprensibilmente assumere sia valori positivi che negativi, comunicando in sostanza se il contenuto idrico stimato dalla PTF risulti inferiore ( $RME < 0$ ) o superiore ( $RME > 0$ ) a quello misurato sperimentalmente; di contro,  $RMSE$  ed  $RRMSE$  si rivelano sempre positivi o al più pari a zero (unicamente nel caso tutti i valori misurati coincidano con quelli stimati).

La pedo-funzione di HYPRES è persa decisamente meglio descrivere l'andamento del dato misurato, mostrandosi la più attendibile per applicazioni ad altra scala territoriale; vi è comunque da evidenziare come la PTF di Vereecken manchi interamente nella determinazione della conducibilità idraulica alla saturazione richiesta dal modello colturale e del parametro  $l$  ad essa riferito. Al di là del valore numerico riguardante la stima dei parametri idrologici annessi alla pedologia aziendale, ciò che interessa sottolineare è il senso pratico di una simile analisi: l'aver potuto asserire idoneità e possibilità di impiego per ambedue le pedo-funzioni proposte, senza dovervi addurre alcun tipo di correttivo ai fini dell'estensione e del trasferimento all'area in esame (calibrazione non necessaria nel merito delle relazioni adottate).

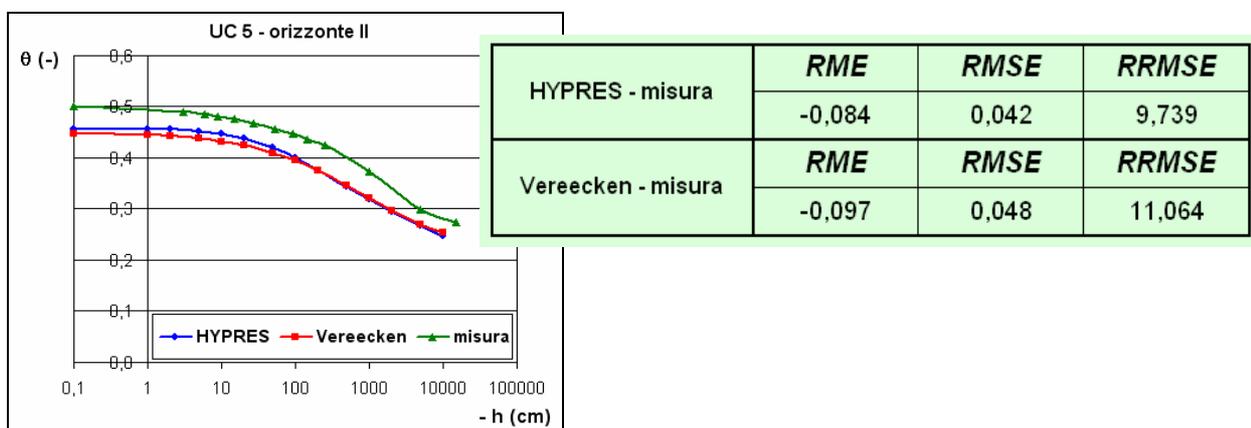


Fig. 4.10 - Confronto rappresentativo tra valori di contenuto idrico misurati e stimati ad opera delle PTF.

Più direttamente, quindi, viene introdotta la descrizione del dato di natura pedologica relativo alla ripartizione e all'assetto di n. 6 distinte tipologie di suolo riguardanti il Boscariello delle 21 complessivamente presenti in Destra Sele, da Carta Suoli (Regione Campania, 2002), in scala 1 : 50.000. Ai fini pratici dell'indagine, tali raggruppamenti potrebbero ridursi a 4, avendo in due casi impegnato porzioni territoriali minime nei confronti dell'estensione complessiva  $Stot$  (unità 2 e 3); tipi, orizzonti, ubicazione/concentrazione areale attinenti a ciascun agglomerato di suolo e parametri idraulici ottenuti dal pedo-trasferimento sono stati sinteticamente riportati in tabella.

UC	sigla	tipo	località	impegno (ha)	% $Stot$
2	MUS0	complesso	torre dei mussi	12	1,02
3	RAG0	complesso	torre dei raghi	5	0,42
4	PAL0	consociazione	torre paladino	326	27,58
5	KIW0	consociazione	kiwi sud	210	17,77
7	RAG1	fase erosa	torre dei raghi	315	26,65
11	FIO0	complesso	fiocche sud	314	26,57

UC	orizzonte	$\theta_{res}$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_{sat}$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$k_{sat}$ (cm/d)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$l$	$n$
2	0-60 cm	0,010	0,432	21,291	0,032	-4,159	1,125
2	60-85 cm	0,010	0,441	9,314	0,032	-4,229	1,091
2	85-155 cm	0,010	0,408	12,716	0,020	-3,445	1,137
2	155-165 cm	0,010	0,440	15,096	0,035	-3,763	1,114
3	0-40 cm	0,010	0,440	34,207	0,042	-4,187	1,129
3	40-85 cm	0,010	0,465	10,619	0,029	-3,717	1,092
3	85-150 cm	0,010	0,447	13,431	0,028	-3,411	1,110
4	0-30 cm	0,010	0,496	54,615	0,028	-2,798	1,131
4	30-75 cm	0,010	0,461	11,105	0,030	-3,791	1,094
4	75-120 cm	0,010	0,513	6,337	0,015	-0,318	1,098
4	120-150 cm	0,010	0,425	11,645	0,020	-1,643	1,144
5	0-30 cm	0,010	0,439	19,046	0,031	-4,197	1,114
5	30-85 cm	0,010	0,434	13,692	0,032	-3,902	1,111
5	85-150 cm	0,010	0,406	17,044	0,027	-3,166	1,154
7	0-40 cm	0,010	0,488	71,306	0,036	-3,182	1,136
7	40-65 cm	0,010	0,465	12,075	0,035	-3,790	1,096
11	0-50 cm	0,010	0,436	14,648	0,024	-3,979	1,124
11	50-80 cm	0,010	0,468	9,729	0,020	-3,398	1,094
11	80-140 cm	0,010	0,481	5,512	0,018	-3,308	1,074
11	140-160 cm	0,010	0,440	12,656	0,025	-3,662	1,109

Tab. 4.2 - Parametrizzazione idrologica alla scala distrettuale del Boscariello.

#### 4.4.2 Uso del suolo e parametri culturali da telerilevamento

Analisi effettuate mediante l'ausilio dei sensori disponibili in corrispondenza delle regioni del visibile e dell'infrarosso dello spettro elettromagnetico hanno prontamente consentito di valutare la radiazione solare riflessa dalla superficie terrestre e, pertanto, di individuare i principali

parametri di copertura vegetale, che, unitamente alla conoscenza del dato agrometeorologico, risultano imprescindibilmente preposti alla stima della stessa  $ET_p$  (par. 3.2.5).

La mappatura definitiva dell'area ha dunque previsto informazioni riguardanti uso e destinazione del suolo e delle colture, a partire dall'analisi interpretativa poc'anzi descritta (spaziale, spettrale e multitemporale) delle immagini telerilevate raccolte ed impiegate per ciascuna annata in studio (con adozione di software *Erdas Imagine*), come indicato nella seguente tabella.

SATELLITE	Landsat 5/7 TM	Spot 2	Spot 4	Spot 5
n. immagini / anno	3 / 2007 - 0 / 2008	0 / 2007 - 2 / 2008	2 / 2007 - 2 / 2008	3 / 2007 - 2 / 2008
altitudine (km)	705	832	822	822
dimensione scena (km <sup>2</sup> )	31.450	3.600	3.600	3.600
risoluzione temporale (giorni)	16	26	26	26
risoluzione spaziale (m)	30	20	20	10
blu (μm)	0,45-0,52	-	-	-
verde (μm)	0,52-0,60	0,50-0,59	0,50-0,59	0,50-0,59
rosso (μm)	0,63-0,69	0,61-0,68	0,61-0,68	0,61-0,68
infrarosso vicino (μm)	0,76-0,90	0,79-0,89	0,79-0,89	0,79-0,89
infrarosso medio (μm)	1,55-1,75	-	1,58-1,75	1,58-1,75
infrarosso medio (μm)	2,08-2,35	-	-	-
infrarosso termico (μm)	10,42-12,50	-	-	-

Tab. 4.3 - Principali caratteristiche dei sensori utilizzati (Landsat 5/7 TM, Spot 2, 4 e 5).

Un'ideale selezione di siti specifici di controllo e misura a terra (*ground control points*), e il successivo confronto da remote sensing con metodo analitico (basato sulla definizione di relazioni matematiche tra riflettanza spettrale e coefficiente colturale associato, in particolare dipendenza dell'effettivo sviluppo del manto vegetale), affiancato da tecniche di classificazione automatica (*unsupervised*), hanno evidenziato la plausibilità delle osservazioni, confermando la validità delle firme associate a ciascuna regione spaziale (Jensen, 1986; D'Urso e Menenti, 1995).

Quest'ultima tecnica ipotizza la presenza di raggruppamenti esclusivi (*cluster*), di numerosità non nota a priori, richiedendone la determinazione ad opera del coinvolgimento di algoritmi di convergenza che, analizzando singoli pixel di immagine in maniera quantificabile e ripetibile, possono supplire, pur se in misura lieve e controllata, all'interpretazione visuale dell'analista, altresì prescindendo dal campionamento al suolo (assenza di *training sites*).

Il metodo può o meno confermare l'esistenza di gruppi costituenti una realtà specifica, oppure evidenziare classi dominanti, inedite e primariamente ritenute omogenee rispetto al criterio applicato; qualsiasi si riveli il metro di classificazione/giudizio prescelto per la misura del livello di affinità o somiglianza tra oggetti, il vero quesito risiede nel punto esatto di arresto (gradimento e soddisfacimento) nei confronti della distribuzione ottenuta; tali algoritmi puntano difatti a generare vere e proprie "linee di confine" tra famiglie di pixel (vi viene associata un'etichetta, fino

a formare una leggenda), anteposte alla realizzazione di mappe tematiche (*layers* unici a colori o in scala di grigi).

L'algoritmo di selezione (in classi specificate: 36, 40, 48, ecc.) potrebbe dunque influenzare la partizione uscente: è dunque risultato di fondamentale importanza interpretare il significato degli stessi criteri di formazione e suddivisione inseriti, per stabilire quale tra le soluzioni individuate potesse più e meglio abbinarsi o adattarsi al sistema culturale investigato.



Fig. 4.11 - Tipico output a colori originato da tecniche di classificazione automatica (classi 36).

Poiché la stessa definizione dell'insieme di firme spettrali non avrebbe potuto in alcun caso rivelarsi unica (idem ed ancor più per gli output prodotti dalla tecnica non assistita ivi descritta), è occorso confrontare a posteriori il risultato delle suddivisioni raggiunte, tramite ulteriori analisi di "separabilità visiva", caratterizzate dalla diligente scissione/rielaborazione di nuove informazioni con seguente riclassificazione e riassetto delle curve di crescita per  $LAI$  e  $k_c$  (medi), estratte dalla globale importazione in ambiente GIS; in definitiva, di fianco allo sviluppo tempo-

rale dei singoli valori introdotti vi è risultato associato un codice coltura specifico (quale effetto della precedente operazione di digitalizzazione in campi opportunamente separati).

Almeno in principio, si è preferito discernere tra varietà simili e/o appartenenti a ciascuna delle tre macroclassi ammesse (erbacee, ortive e arboree), pervenendo alle n. 12 classi elencate:

- 1) mais precoci (giugno-luglio)
- 2) mais (luglio-agosto)
- 3) mais tardivi (agosto-settembre)
- 4) erbai precoci (maggio-luglio): sorgo, avena, fumento, mais a ciclo breve
- 5) prati, pascoli, altri erbai (giugno-settembre): loietto, trifoglio, festuca, ecc.
- 6) erbai a sfalci evidenti e simmetrici (luglio-agosto): medica e/o similari ( $k_c > 0,9$ )
- 7) arboree A: grandi areali includenti pesco, albicocco, susino, ciliegio, pero ( $0,9 < k_c < 1,2$ )
- 8) arboree B: piccoli areali includenti ulivo ( $0,6 < k_c < 0,9$ )
- 9) arboree C: impianti giovani in prevalenza come da frutteti del tipo A ( $0,3 < k_c < 0,6$ )
- 10) orticoltura da pieno campo (giugno-luglio): pomodoro, lattuga, fragola, anguria, ecc. ( $k_c < 0,8$ )
- 11) terreni liberi e/o piccoli orti ( $k_c < 0,35$ )
- 12) medio-grandi areali regolarmente soggetti a lavorazioni estive del terreno ( $k_c < 0,3$ )

Quanto alla complessiva profondità degli apparati radicali, per ciascuna tipologia colturale si è rivelato indispensabile indicarne la rispettiva evoluzione fenologica, strettamente legata alla capacità delle piante di estrarre acqua dal terreno, da un “serbatoio” più o meno grande (spessore variabile) rappresentato dalle dimensioni del volume di suolo esplorato dalle radici.

classe	$h_{3h}$	$h_{3l}$	$h_4$	profondità radicale per fasi fenologiche (cm)		
	per $T_p = 5$ mm/d	per $T_p = 1$ mm/d	appassimento	inizio	accrescimento	pieno sviluppo
1	-400	-700	-8000	40	60	70
2	-400	-700	-8000	40	60	70
3	-400	-700	-8000	40	60	70
4	-400	-800	-8000	30	60	80
5	-300	-600	-7000	30	40	30
6	-700	-900	-10000	110	120	120
7	-900	-1100	-12000	80	80	80
8	-1100	-1300	-14000	80	80	80
9	-400	-800	-10000	30	30	30
10	-600	-900	-9000	30	50	60
11	-700	-1000	-10000	20	30	40

Tab. 4.4 - Potenziali critici e profondità radicali delle colture estratte dall'analisi.

Minime differenze rilevate all'interno di una stessa macroclasse colturale, spesso imputabili alla naturale rotazione di talune produzioni ortive e/o piantagioni erbacee nei confronti di altre similari, oppure alla sostanziale difformità tra erbacee di età o entità distinta, avrebbero sicuramente offerto impatti ridotti ai fini dell'elaborazione da parte del modello di bilancio medesimo,

come nel merito del corretto adempimento della pratica irrigua; tutto questo, a parità d'uso o destinazione, porterebbe unicamente a variare (anticipare o posticipare) tempi e modalità di semina e raccolto, comportando semplici slittamenti di carattere fenologico e null'altro ancora.

Si pensi alla contemporanea presenza sul territorio di mais precoci e tardivi: il quantitativo idrico stagionale richiesto potrebbe ritenersi pressoché analogo o inalterato (Bausch, 1995).

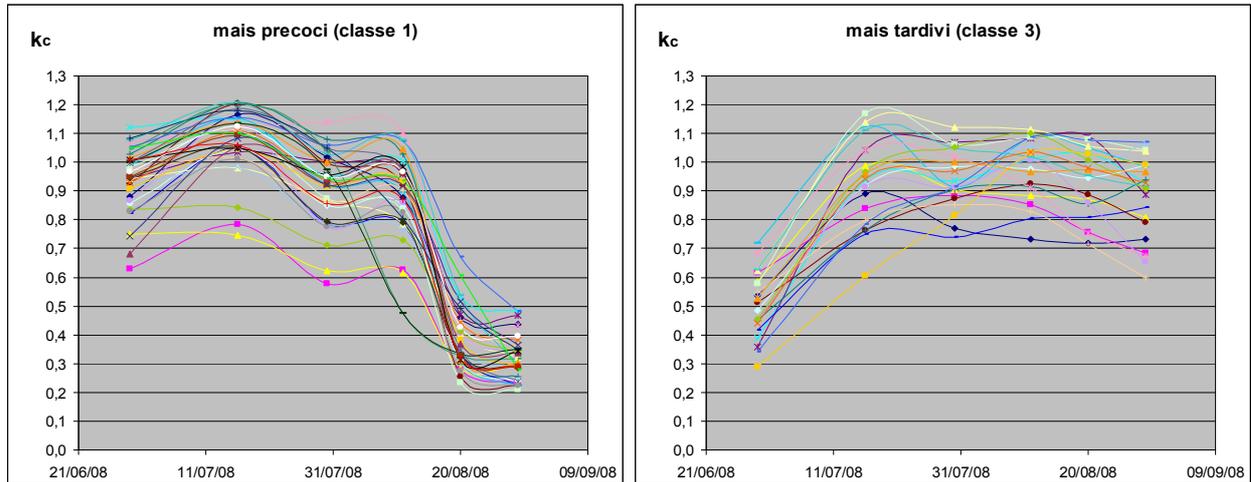


Fig. 4.12 - Valori del coefficiente culturale  $k_c$  per classi 1 e 3 (mais precoci e tardivi) poste a confronto.

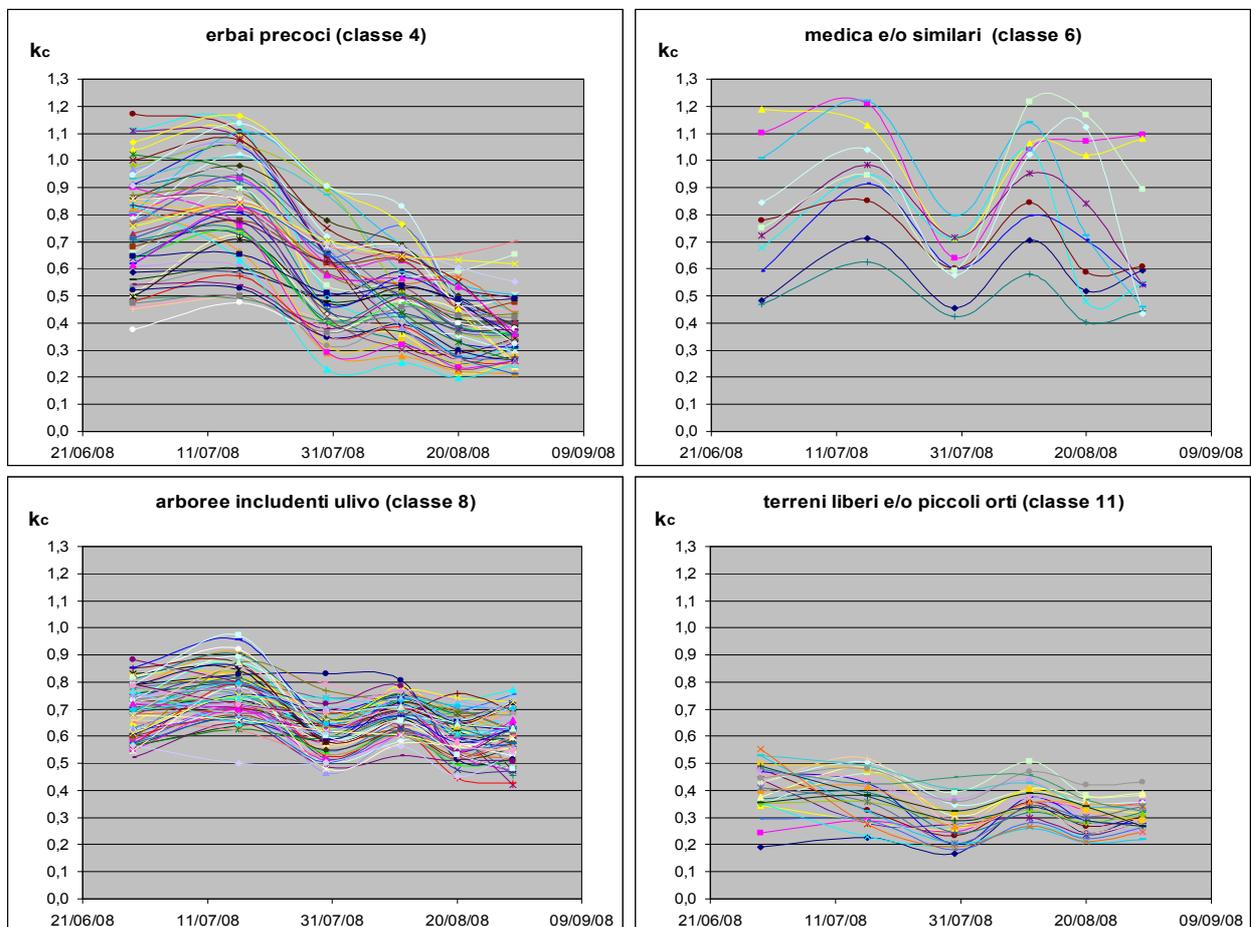


Fig. 4.13 - Sviluppi fenologici a raffronto: andamento del coefficiente culturale  $k_c$  per classi 4, 6, 8, 11.

### 4.4.3 Input climatico del modello

Dall'attenta acquisizione del dato di natura climatica in Improsta è stato possibile pervenire alla stima dell'evapotraspirazione di riferimento  $ET_o$  (par. 3.2.1), per un arco di tempo tale da assicurare lo stabilizzarsi delle condizioni al contorno richieste dal modello (fin dalla seconda metà di marzo). Ai fini del bilancio idrologico alla scala designata, l'informazione avrà inoltre riguardato l'inserimento del valore di piovosità  $P$  giornaliera netta per la stessa durata sopraindicata. SWAP prevede una routine per il calcolo della precipitazione netta a partire dagli afflussi meteorici lordi misurati alla centralina agrometeo, nell'ipotesi di precipitazione costante su tutta l'area avendo impiegato un unico punto di misura; tale approssimazione può ritenersi attendibile considerata l'esiguità delle precipitazioni estive.

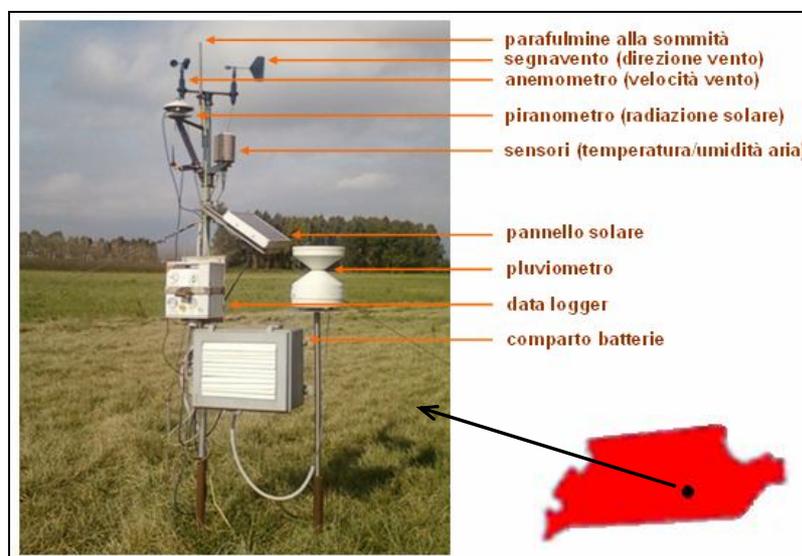


Fig. 4.14 - Centralina per l'osservazione dei parametri agrometeorologici (Azienda Improsta).

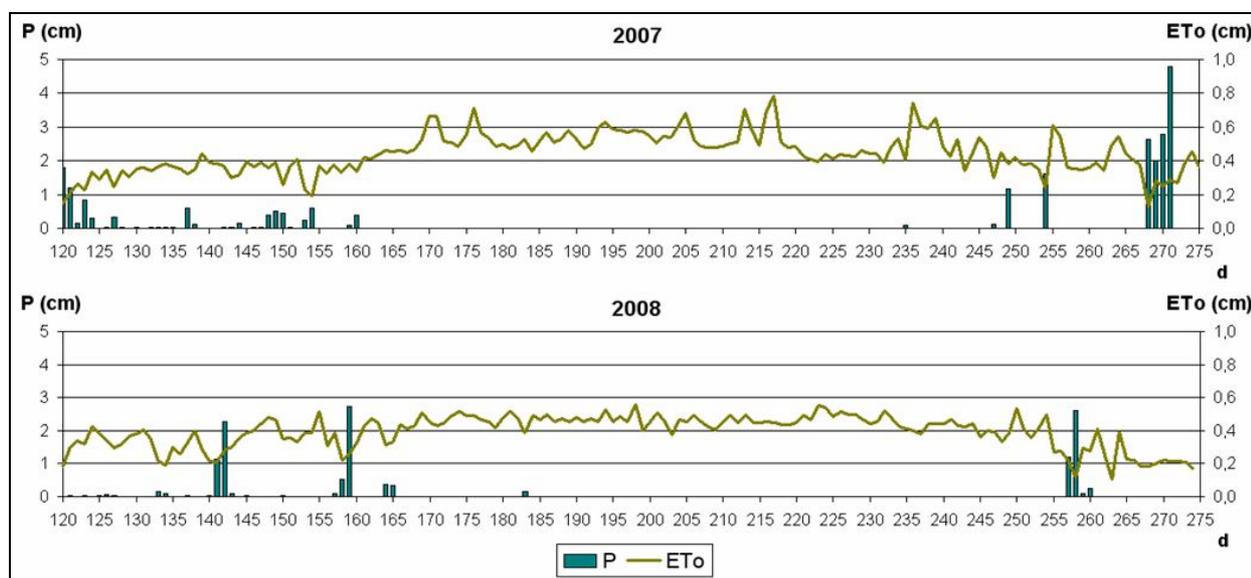


Fig. 4.15 - Piovosità ed evapotraspirazione di riferimento a confronto (maggio-settembre, 2007/2008).

### **5.1 Considerazioni generali riguardo alle analisi svolte**

L'azione svolta dal DSS si è rivelata indispensabile ai fini del conseguimento degli obiettivi preventivamente enunciati. L'applicazione avrà coinvolto tutti gli elementi e/o aspetti considerati nell'ambito del Boscariello, primo fra tutti quello relativo all'andamento dei prelievi effettivi, sia presso singoli gruppi di consegna aziendale che alla scala settoriale dei reparti costituenti globalmente il sistema (informazione aggregata).

La veridicità delle misure è stata confermata dal rapporto tra queste e l'entità della piovosità stagionale, inferiore nel 2007 rispetto al 2008 (vi corrispondono maggiori consumi all'idrante e viceversa); per entrambe le annate, l'andamento della stessa piovosità, ha avvalorato e giustificato pienamente la maggior concentrazione di apporti artificiali nei mesi estivi (luglio in particolare), con un picco di irrigazione massima, riferita all'intero impianto, lievemente al di sopra del valore 50.000 m<sup>3</sup> per anno 2007 ed in prossimità dei 40.000 m<sup>3</sup> per stagione 2008.

Dalla fedele ricostruzione (riproduzione) di quanto concretamente verificatosi in entrambi i casi e dall'attenta analisi del prototipo reale (scenario di riferimento) avranno potuto svilupparsi inedite soluzioni di intervento (scenari di gestione alternativa), in un'ottica pregevolmente legata al relativo conseguimento di risparmi idrici stagionali (oltremodo evidenti e significativi per annata 2007) ed implicitamente associata all'incremento dell'efficienza irrigua.

Sebbene la lettura dei dati reali di consumo sia parsa necessariamente adattarsi o comunque riflettersi sul risultato delle simulazioni separatamente effettuate per le annate in studio, un simile binomio informativo potrebbe in sé rivelarsi sufficientemente indicativo dell'erogazione "media stagionale" di impianto, mostrando utili suggerimenti riguardo ad ipotetici o venturi provvedimenti gestionali (mutamenti o accorgimenti minimi di ordine strutturale, tecnologico, logistico, ecc.), per un impiego del supporto decisionale nel medio-lungo termine.

Allo stato attuale, considerate le uscite prodotte dal SIMODIS, parrebbero decisamente affermarsi/consolidarsi giudizi e riflessioni preventive inerenti al possibile sovradimensionamento della rete di condotte in pressione (ampiezza diametri eccessiva); ulteriori e approfondite indagini, anche nell'ambito dell'apparato di telecontrollo adibito alla direzione di impianto, potrebbero posteriormente indurre alla riprogettazione (parziale o complessiva) di talune aree o settori.

Come realisticamente ipotizzato e/o atteso in tale fase, apporti irrigui ridotti avranno potuto dar luogo a quantitativi idrici in volume diretto in falda altrettanto contenuti, prescindendo o meno dalla peculiare natura dei suoli e delle colture partecipi (livello di percolazione assoluta).

## 5.2 Comparazione tra apporti reali e simulati

Noto l'andamento dei prelievi effettivi, un primo esame ha concretamente consentito di rivolgere l'attenzione al tipo di condotta palesata dalle utenze nell'arco delle due stagioni interessate; picchi di irrigazione elevati a fronte di altri eccessivamente ridotti ed intervalli temporali mal dispensati sono risultati sintomatici dell'inefficienza operativa e gestionale da parte di alcune di esse; un tale orientamento avrà ancor più evidenziato il carattere fortemente soggettivo, spesso erroneo, nei riguardi delle valutazioni o delle scelte adoperate e, come prevedibile, la duplice assenza di conoscenze o indicazioni nell'ambito di procedure specifiche e dei distinti processi conseguentemente annessi alla natura e alle stesse peculiarità delle specie colturali presenti.

Come osservato, SIMODIS tiene conto di tutto ciò in presenza di idonee condizioni al contorno superiori e inferiori, quali parametri agrometeorologici, altezza del ponding generata da fenomeni di scorrimento superficiale, eventuale posizionamento della falda acquifera e tipologie di scambi col sottosuolo; tramite soglie e quantitativi di intervento opportunamente ponderati e distanziati, è stato possibile modulare al meglio le stesse irrigazioni, adattandole all'andamento dei consumi idrici delle colture e degli apporti naturali (condizioni ambientali di riferimento).

*Esempio: quanto possa verificarsi in entrambi i casi viene emblematicamente illustrato per una generica particella i-j-k: prelievi misurati e stimati, con apporto irriguo fisso ipotizzato pari ad 1,2 cm oppure in presenza di contributi variabili, in egual modo equilibrati e dipendenti dal livello di deficit di volta in volta riscontrato, avendo posto  $i_r = 0,15$  ed  $i_r = 0,25$  (per quest'ultima evenienza, puntando primariamente a ridurre la frequenza, pur senza eccedere in valore massimo).*

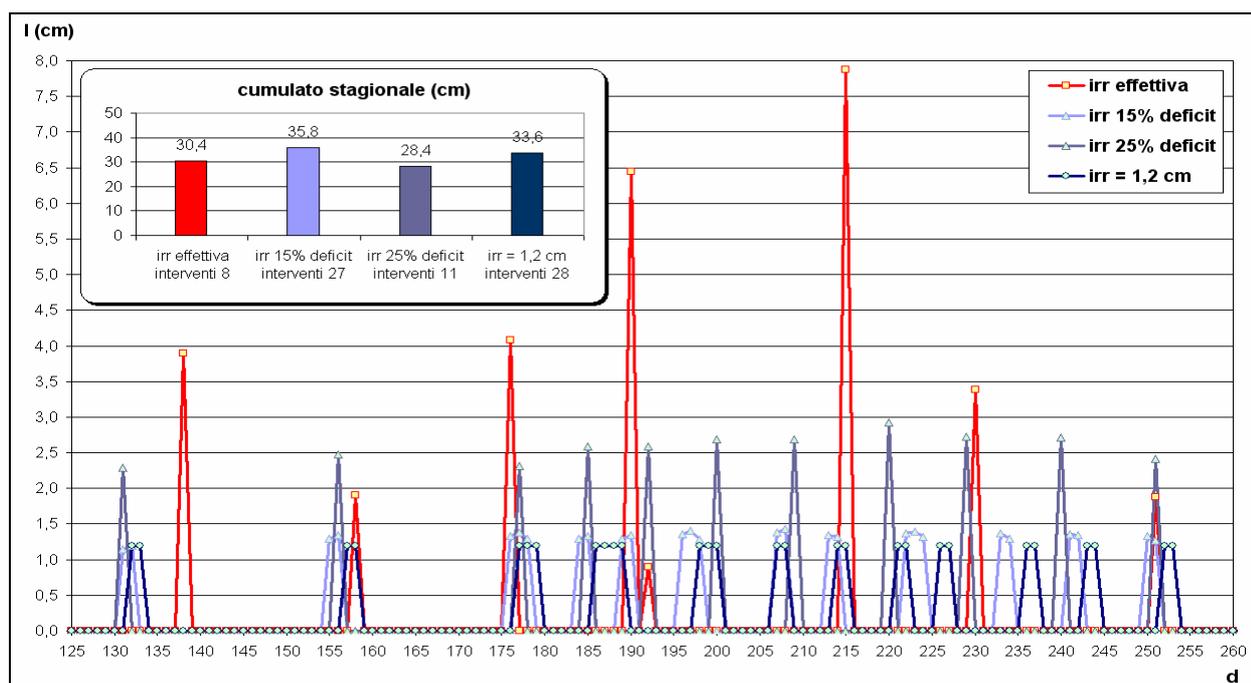


Fig. 5.1 - Apporti irrigui reali e simulati (fissati e variabili) per un pesco;  $i = 2$  (Sud),  $j = 171$ ,  $k = 1$ .

### **5.2.1 Criteri di irrigazione preliminarmente adottati: selezione del prototipo di riferimento**

Non tanto al fine di snellire la ricerca, quanto piuttosto allo scopo di agevolare i rapporti di lettura ed interscambio di informazioni tra utenti e stessi operatori del settore (evidenti difficoltà sarebbero unanimemente incontrate e manifestate dai primi nell'apprendere i processi a sostegno degli studi e delle decisioni attuate in virtù delle motivazioni di ordine tecnico-scientifico ad esse annesso), oltre che per ragioni inerenti a fattori di carattere principalmente logistico, si è optato, almeno inizialmente, per l'ammettere volumi di adattamento costanti.

Si pensi alla naturale quanto diffusa propensione da parte degli stessi agricoltori nel fornire intenzionalmente quantitativi irrigui prefissati alle colture o, in altri casi, all'adozione sistematica di durate temporali predeterminate in merito all'attivazione del flusso idrico: alla dotazione assegnata (10 o 20 l/s), indurrebbero ad aliquote settimanali, decadali o mensili di prelievo all'idrante altrettanto invariate, pur tendenzialmente prescindendo dal valore esatto di intervento.

Ciò precisato, si è imposto di assistere la pianta ogni qualvolta fosse raggiunta e superata la soglia in corrispondenza del potenziale medio tra  $h_{3h}$  e  $h_{3l}$  nei primi 50 cm dell'apparato radicale (indice di stress per la pianta); inoltre, ai fini dell'applicazione SWAP, non si è tenuto conto del coefficiente di stress salino  $\alpha_{rs}$ , ma del solo coefficiente di stress idrico  $\alpha$  descritto dalla funzione di riduzione di Feddes e definito dal rapporto  $T_a/T_p$  (par. 3.2.5). In tutti i casi proposti sono state parimenti poste condizioni di drenaggio verticale libero, con falda sita a 2 m di profondità rispetto al piano campagna ed irrigazione consentita fin dalla seconda metà di aprile.

L'impiego del SIMODIS ha inizialmente riguardato la simulazione di soli scenari ad apporto fisso, tra 1,1 ed 1,5 cm; accanto all'osservazione dei valori medi, l'analisi avrà previsto la lettura del picco stagionale massimo raggiunto in relazione a ciascun gruppo di consegna ispezionato; in conseguenza di ciò, l'effetto complessivo sarà risultato direttamente imputabile alla somma delle irrigazioni k-esime all'interno di una stessa regione secondaria di appartenenza.

La condizione di apporto fisso 1,1 cm avrebbe prodotto ripetuti raggiungimenti del potenziale critico  $h_{3m}$  (frequenza di intervento elevata) e una marcata sovrastima nei confronti dei fabbisogni richiesti. Il miglior contesto possibile tra le situazioni analizzate avrebbe al contrario potuto rivelarsi quello relativo allo scenario del caso 1,3 cm, contingenza che, tuttavia, avrebbe oltremodo sottostimato il dato 2007 globalmente registrato a fronte dell'eccessiva durata intercorrente tra contributi irrigui (frequenza di intervento ridotta); più in sicurezza, si è giunti a stabilire un valore intermedio di 1,2 cm.

La decisione è stata in parte dettata dall'esigenza di dover sopperire alla parziale perdita di informazioni inerenti ad alcune AcquaCard (par. 4.2.2), per cui dal preciso intento di poter diversamente compensare o controbilanciare una simile assenza.

Risulta debito precisare, peraltro, come minime sottostime (2007) o, viceversa, sovrastime (2008) da parte del modello rispetto alle osservazioni rilevate dovranno esplicitamente attribuirsi alla volontaria ricerca di un contributo “medio”, ancorché fisso, funzionale ad entrambe le annate in studio. In ragione della scelta di 1,2 cm effettuata, il valore giornaliero di irrigazione palesato, sarà apparso compreso tra 0,14 (apporto giornalieri maggio-settembre 2008) e 0,18 cm (apporto stesso periodo anno 2007); prescindendo dalle tipologie colturali investite nel corso delle stagioni, appare in conclusione evidente come la media delle due annate abbia potuto attestarsi intorno a 0,16 cm (1,2 cm figurerebbero un valore di intervento settimanale o poco più).

In questa prima fase, si è rivelato opportuno eseguire il sopraindicato confronto tra stime e misure di prelievo anche in assenza di obblighi o vincoli di natura sistemica trasmessi dalla rete in pressione; in altre parole, il modello può opzionalmente consentire di anticipare alcune riflessioni in relazione all’esito del bilancio idrologico di unità terziarie spettanti a determinate aziende, posticipando o temporaneamente omettendo analoghi e/o contemporanei accadimenti in altri punti del comprensorio.

Mediante un’indagine di tipo aggregato sulle informazioni di prelievo disponibili (raggruppamento alla scala distrettuale dei singoli reparti e a quella dell’intero complesso del Boscarello) è stato possibile ottenere un valido e definitivo riscontro in merito ad affidabilità ed accuratezza delle stime integralmente pervenute (più o meno prossime alle osservazioni al variare dei gruppi di consegna selezionati) e dunque in riferimento ad autenticità ed efficacia da parte del prototipo (livello di precisione raggiunta ad opera della capacità di riprodurre la condizione reale in un caso o nell’altro).

#### **Anno 2007**

Un campione composto da 28 idranti all’interno dei reparti Sud (in n. 9), Fioche in (n. 12) e Rosale (in n. 7) ha posto in risalto una discreta correlazione sui totali stagionali tra prelievi misurati e stimati, sia in assenza ( $R^2 = 0,34$ ) che in presenza ( $R^2 = 0,38$ ) di vincoli annessi alla rete distributiva e risorsa limitata, rivelando una similitudine superiore rispetto all’evento di disponibilità idrica illimitata (carente e approssimativo ai fini della logica del criterio e della condotta di insieme), con un rapporto  $SIM/eff = 0,89$ . Tale rapporto avrà in parte assistito l’analisi risultando indicativo della distanza intercorrente tra somme in volume erogato (per modello e realtà), il cui assoluto equilibrio ingenererebbe un valore comprensibilmente unitario.

Per ambedue le posizioni citate, un campione ridotto a 21 idranti, attraverso la temporanea esclusione del distretto Rosale (prevalenza di colture arboree, tendenzialmente richiedenti apporti irrigui inferiori), indurrebbe a rafforzare il predetto legame ( $R^2 = 0,47$ ) in opposizione alla sostanziale invariabilità o fedeltà riguardo a  $SIM/eff$ , di poco superiore a 0,9.

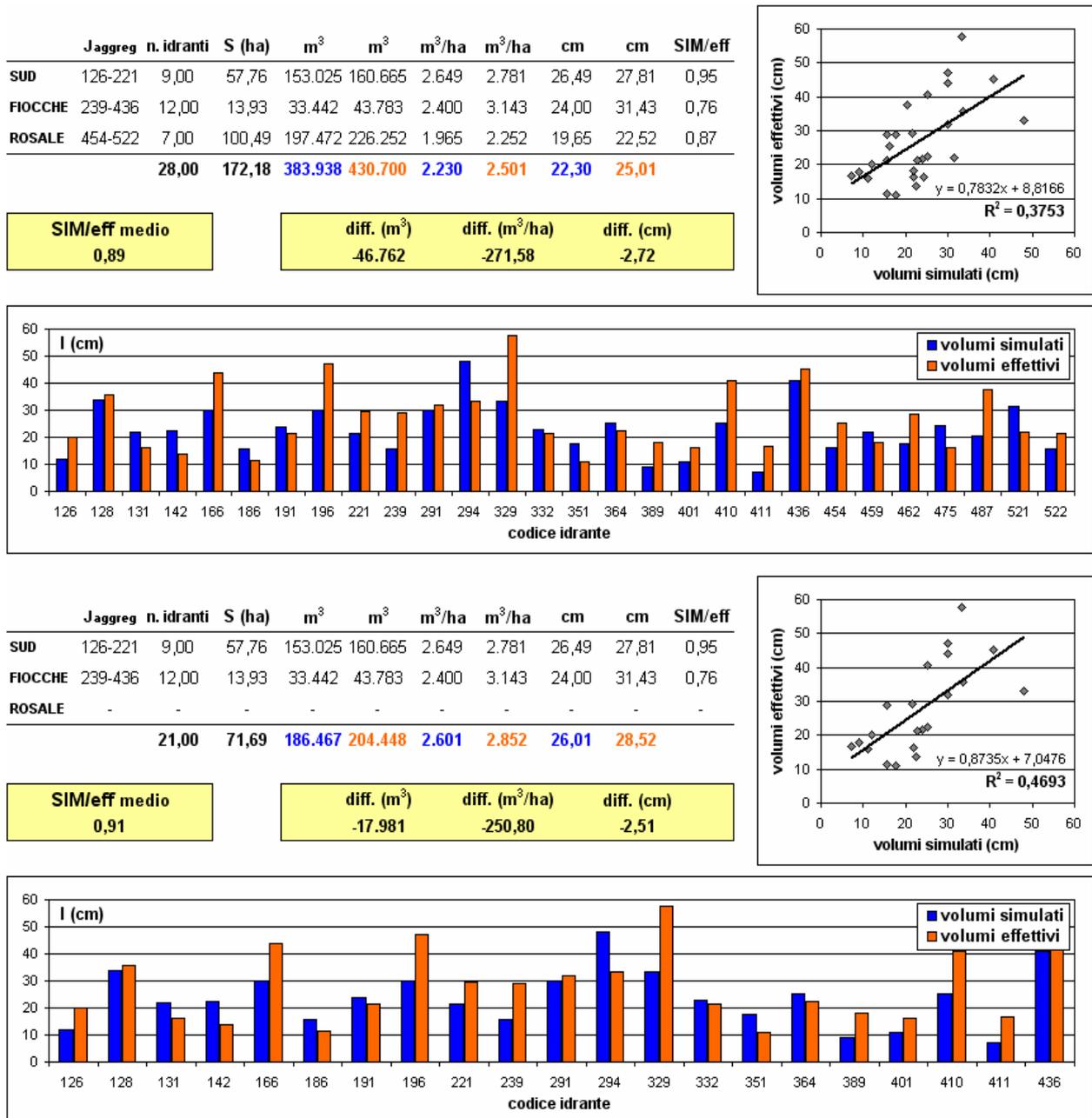


Fig. 5.2 - Scenario di riferimento (2007): comparazione e correlazione tra stime e misure di prelievo relative ai gruppi di consegna selezionati, in presenza/assenza del comparto Rosale.

### Anno 2008

Il campione, limitato a 16 idranti (non nei confronti dell'area complessivamente impegnata, di fatto inalterata) per gli stessi reparti Sud (in n. 7), Fiocche (in n. 5) e Rosale (in n. 4), ha confermato e validato la precedente risposta in relazione al raffronto tra totali osservati e simulati in assenza ( $R^2 = 0,55$ ) o in presenza ( $R^2 = 0,68$ ) di vincoli, potendo appurare  $SIM/eff = 1,1$  nuovamente prossimo all'unità; in tal caso, l'ipotesi di poter visionare il campione a meno del comparto Rosale, fissandolo a 12 soli elementi, non recherebbe ulteriori variazioni in termini di analogia prodotta tra uscite fornite dal DSS e misure rilevate presso i contatori di reparto ( $R^2 = 0,67$ ).

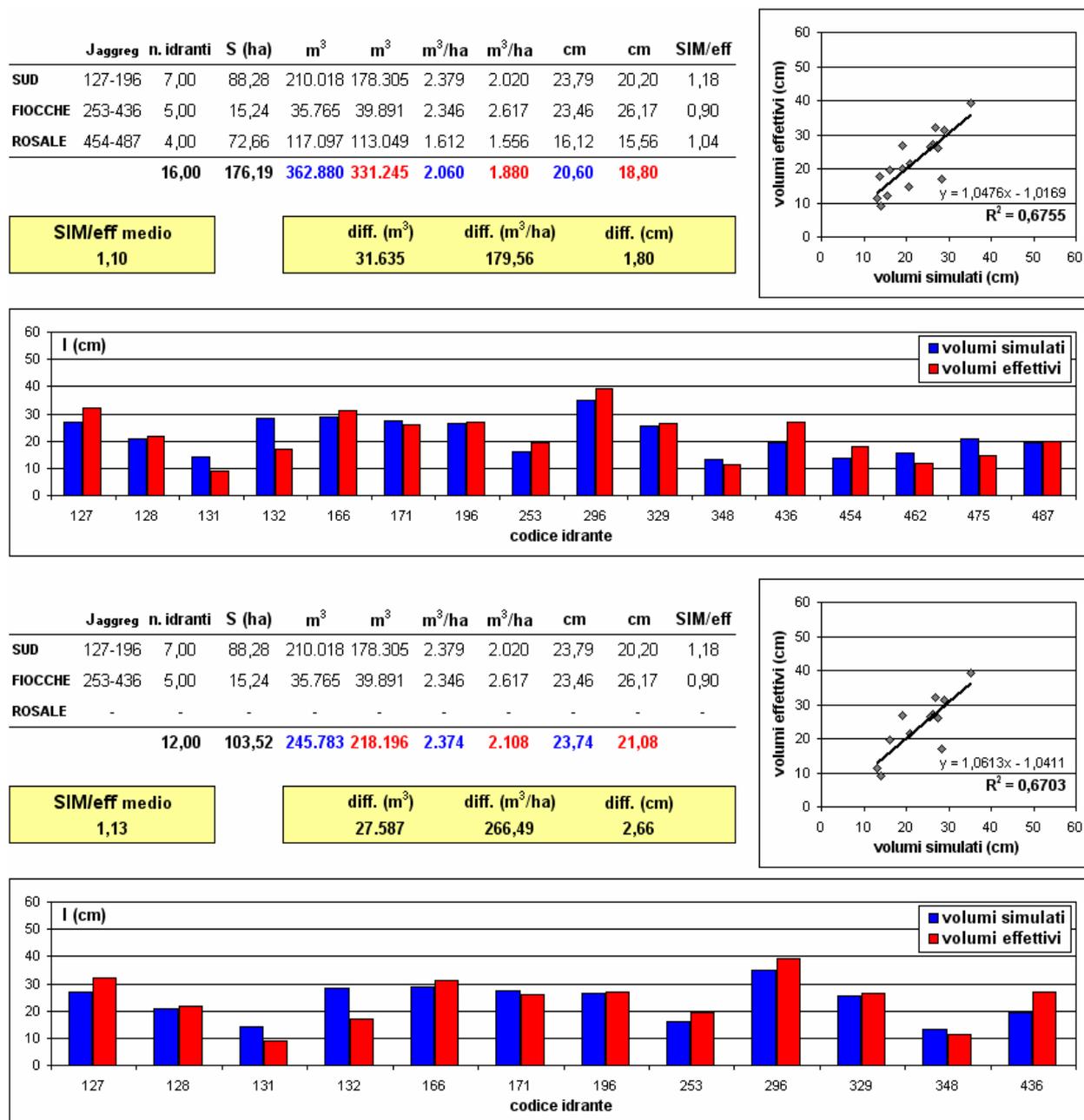


Fig. 5.3 - Scenario di riferimento (2008): comparazione e correlazione tra stime e misure di prelievo relative ai gruppi di consegna selezionati, in presenza/assenza del comparto Rosale.

### 5.2.2 Distribuzione stagionale del fabbisogno irriguo mediamente conferito alle colture

Nel complesso delle colture coinvolte (par. 4.4.2) è parsa in ultimo correttamente verificata l'ipotesi secondo la quale alcune gamme erbacee (mais su tutte) avrebbero richiesto quantitativi idrici superiori; nel mezzo avranno potuto indistintamente collocarsi tipologie di ogni genere, tra cui ortive (con spiccata propensione alla coltura del pomodoro), specie arboree relativamente anziane (pesco in prevalenza) ed altri insiemi erbacei (medica, sorgo, avena, frumento, ecc.), mentre, all'estremità inferiore, inserirsi frutteti più giovani; in tutti questi casi, a meno della possibile

presenza di piccoli orti e/o terreni liberi, la sola alternativa ad apporto irriguo modesto viene comunemente raffigurata da superfici limitatamente estese, tipicamente includenti ulivo.

Le difformità evidenziate ed espresse riguardano la somministrazione irrigua media stagionale di ciascun raggruppamento (classi 1-11); come da attese, l'ultima categoria (12), appositamente destinata ad accogliere medio-grandi areali sottoposti a lavorazioni estive del terreno, avrà manifestato irrigazione praticamente assente o comunque ininfluente agli scopi dell'esame (livello di criticità irrilevante; vi è corrisposta un'aliquota inferiore all'1% del volume totale irrigato).

Per l'una o per l'altra annata, a fronte dell'equità di informazioni relative ad uso del suolo e tipizzazione pedo-idrologica dell'area (parametrizzazione dei terreni partecipi alla scala designata), potranno valere le medesime considerazioni, a meno di un'aliquota del 15-35% prontamente giustificata dalla particolare entità/misura dell'input immesso; la causa primaria della differente conformazione della distribuzione di domanda pervenuta risiede nell'aspetto profondamente diversificato delle acquisizioni di carattere agrometeorologico e fenologico, estremamente variabili per una data stagione o più. Come osservato, a variare, alterandone di conseguenza il totale giornaliero, settimanale, mensile e per l'appunto stagionale, potrebbero essere: n. di parcelle  $k$  irrigate all'interno di una medesima regione di influenza, frequenza e durata delle applicazioni, dipendente dal tempo di attivazione di ciascun idrante (non necessariamente massimo).

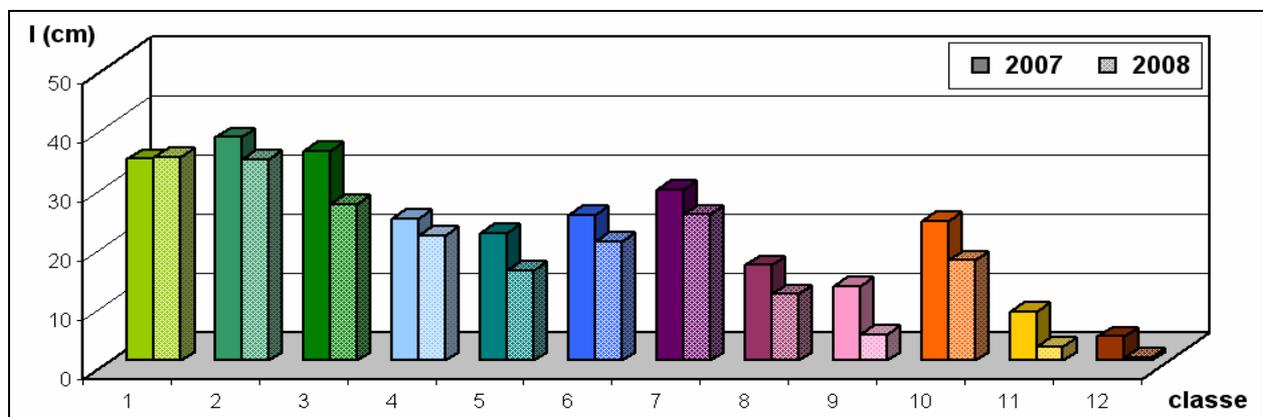


Fig. 5.4 - Classi colturali coinvolte e relativi fabbisogni irrigui (somministrazioni medie stagionali).

### 5.2.3 Indicazioni utili sulla base degli sviluppi separatamente ottenuti

L'applicazione ha consentito di rivolgere l'interesse al tipo di condotta palesata dalle utenze nell'arco delle singole stagioni indicate, mediante una modalità di simulazione definita e selezionata quale "scenario di riferimento"; il prototipo è stato assunto al fine di ridurre gli scarti fra prelievi misurati e stimati, coinvolgendo i parametri irrigui globali  $i_r$ ,  $V_{RES}$  e  $H_{min}$  (par. 3.1.3), nel caso specifico così identificati:  $i_r = 120 \text{ m}^3/\text{ha}$  (1,2 cm), per irrigazione fissata ad ogni intervento,  $H_{min} = 40 \text{ m}$ ,  $V_{RES} = 55.000 \text{ m}^3$ .

Come prontamente evidenziato dalle aggregazioni compiute in fase di calibrazione e definizione di tale scenario, gli interventi simulati sono apparsi complessivamente appropriati e concordemente in linea con quanto avvenuto nelle distinte partizioni del Boscarello (ben poche perplessità riguardanti a una possibile o eventuale soluzione del DSS per difetto/eccesso).

Una fugace considerazione nel merito dei prelievi attiene a quelli effettivi, in tal caso “previsionati” per l’intero impianto, proporzionalmente derivabili sulla base dalle sole regioni di influenza rispondenti alla frazione nota del 10% circa nei confronti del totale AcquaFix (15% della superficie irrigabile); una simile operazione dovrà recepirsi nell’intento di poter rendere attuabile il confronto tra stime e apporti reali “globalmente indotti” su  $Stot = 1.182$  ha, quale ulteriore conferma dell’efficacia e dell’attendibilità delle simulazioni effettuate.

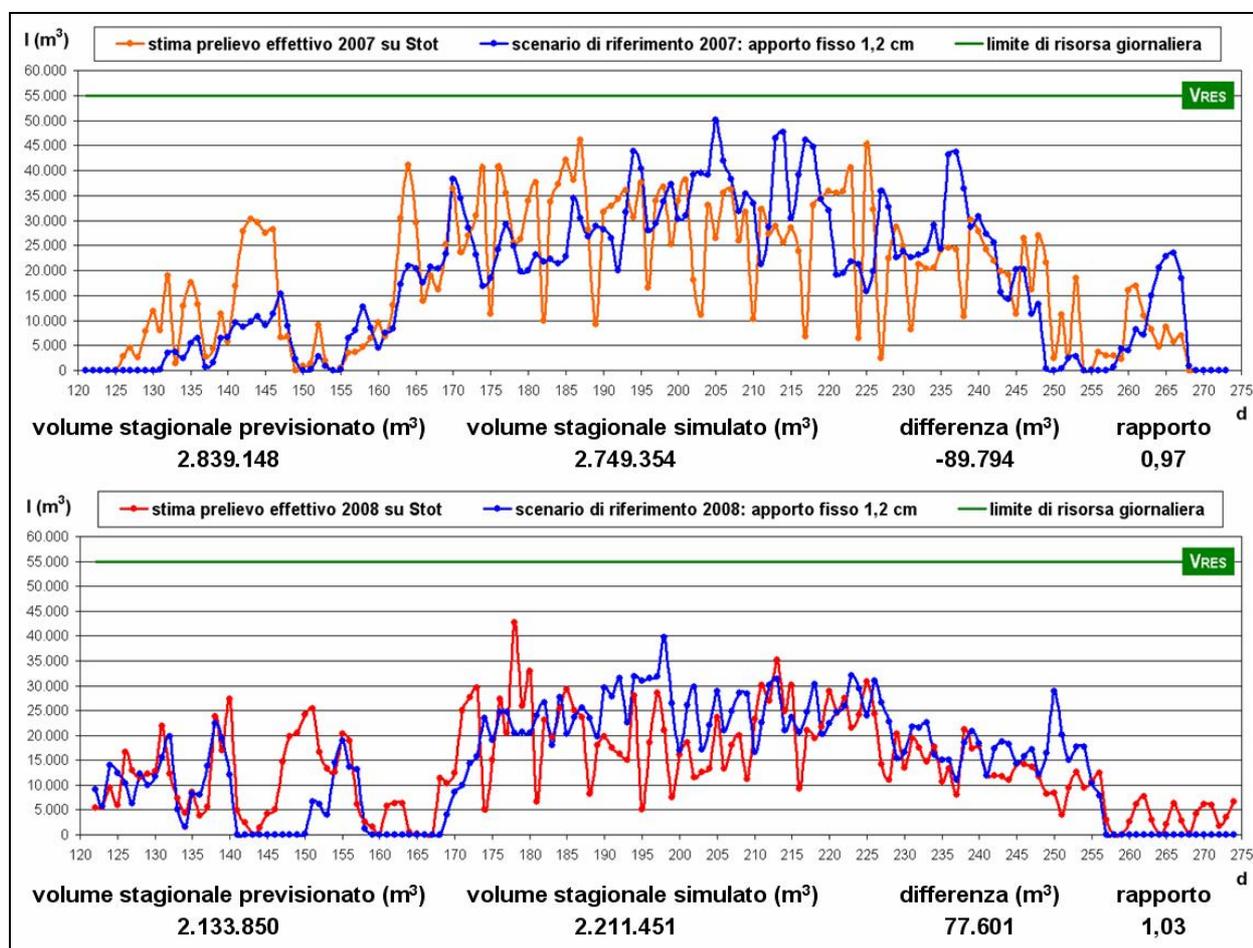


Fig. 5.5 - Distribuzione temporale dei prelievi effettivi (previsionati per l’intero impianto) e simulati.

Pur in assenza del raggiungimento del limite di risorsa consentito, l’irrigazione effettiva risulterebbe concentrata in giorni specifici, dando luogo ad improvvise discontinuità e alla chiara, innegabile sussistenza di vuoti e/o sbalzi in taluni frangenti a fronte di altri (picchi elevati); tutto ciò non sarà avvenuto nel computo delle elaborazioni e delle uscite prodotte dal SIMODIS, che, in conformità e accordo all’attitudine e all’adeguatezza dell’input inserito per le due annate, avrà

eseguito un congruo e visibile bilanciamento complessivo (sicché non tutta la richiesta idrica potesse o dovesse necessariamente innescarsi/adempirsi nelle medesime 16 ore); possibili convessità o avvallamenti, all'interno della stessa distribuzione temporale, saranno stati più correttamente osservati in seguito ad eventi di piovosità giornaliera di natura particolarmente intensa (4.4.3).

La riflessione viene altresì rivolta alla stessa entità del risultato acquisito, che avrà in sé rivelato un comportamento di insieme diffusamente virtuoso, plausibilmente originato da privata o individuale attività di monitoraggio prelievi da parte di numerose utenze, nel complesso, supportate/agevolate dall'ausilio e dall'impiego della tecnologia AcquaCard (prescindendo dal criterio di tariffazione adottato, il sistema garantirebbe accesso ai gruppi di consegna, e quindi alla risorsa, solo e soltanto previo inserimento tessera elettronica prepagata).

#### **5.2.4 Verifica in condizioni di funzionamento ordinario (rete distributiva e vincoli imposti) e non**

Si è infine proposto un parallelo tra soli scenari di riferimento, inserendo, per convenienza integrità e dell'esposizione, anche il caso di risorsa illimitata; quest'ultimo, opportuno ribadirlo, è risultato solo ed esclusivamente introdotto ai fini illustrativi/comparativi, non ottemperando ad alcuno dei vincoli o requisiti fondamentali di sistema e al più fornendo indicazioni di ordine qualitativo, preventivo e tendenziale circa singoli valori di intervento irriguo rispondenti a determinate unità terziarie; al contrario, la tesi di interesse prevede la coesistenza e la partecipazione simultanea di tutti i nodi appartenenti al complesso distributivo con esercizio alla domanda indagato, accanto alla verifica giornaliera delle tre condizioni, per evidenza e semplicità richiamate:

1)  $I_{ij} \leq Q_{ij} \cdot \Delta t_{max}$ , dove  $Q_{ij}$  risulta essere la portata del gruppo di consegna e  $\Delta t_{max}$  il tempo di attivazione massimo;

2)  $V_d \leq V_{RES}$ , ove  $V_d$  rappresenta il volume complessivamente richiesto nel giorno  $d$  considerato, ovvero  $I$ , domanda totale di sistema (in tutta l'area), e  $V_{RES}$  quello disponibile;

3)  $H_{ij} \geq H_{min}$ , con  $H_{ij}$  valore del carico piezometrico alla consegna ed  $H_{min}$  il valore minimo richiesto.

Si noti come  $V_{RES}$  sia stato superato in una sola circostanza, per anno 2007, in predetta assenza del vincolo  $V_d \leq V_{RES}$  e in coincidenza di  $d = 217$  (unico giorno a mostrare il sopraggiungere di una criticità nell'approvvigionamento idrico di sistema); l'attivazione del vincolo medesimo (risorsa limitata) e delle altre condizioni, avrà prontamente riportato il valore eccedente al di sotto della soglia consentita. SIMOSIS avrà provveduto alla chiusura giornaliera di alcune unità secondarie  $j$  (unità meno esposte a deficit idrico), in congiuntura della non osservanza delle verifi-

che 1) e 3), inerenti carico piezometrico minimo alla consegna e massimo fabbisogno consentito in 16 ore riguardo a ciascun idrante o, in casi estremi, per mancato assolvimento della 2), di una tra le primarie.

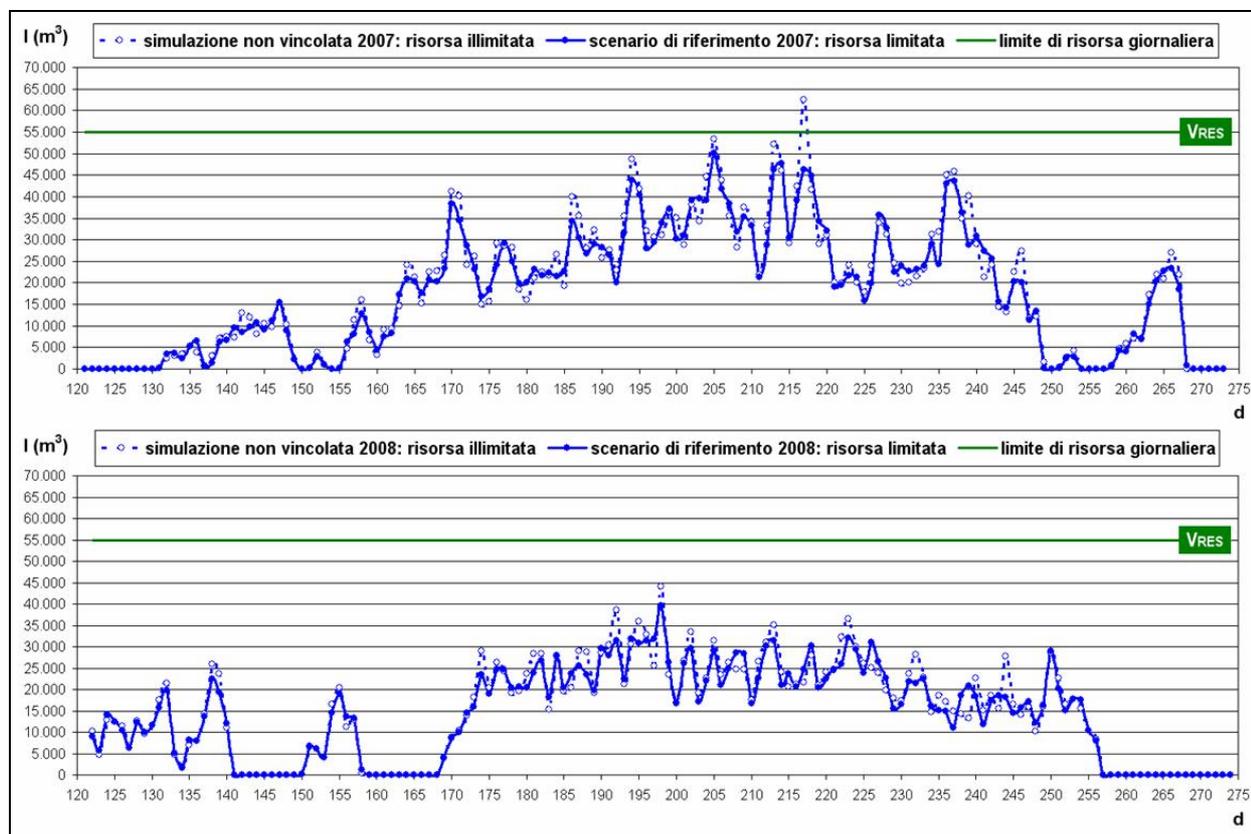


Fig. 5.6 - Andamenti simulati a raffronto: evento di risorsa illimitata e scenario di riferimento.

Secondo quanto mostrato dalla distribuzione spaziale (par. 5.2.1) e temporale appena illustrata, avrà potuto concretamente enunciarsi la validità delle scenario di riferimento nel raffronto con le altre proposte seguitamente riferite (simulazioni effettuate e volumi ottenuti in oggettiva e compiuta rappresentanza delle misure rilevate).

### 5.3 Incremento prestazionale di sistema: scenari alternativi di gestione irrigua

È stata eseguita una valutazione comparativa per distinte strategie di gestione irrigua, variando i parametri caratteristici  $i_r$  e  $V_{RES}$ . Dalle simulazioni relative ai diversi scenari è stato possibile ottenere alcune indicazioni per orientare la stessa gestione irrigua verso una progressiva riduzione dei consumi stagionali riferiti alle colture (5.3.2) e, più in generale, del volume totale di impianto  $V_{tot}$  (5.3.1). L'obiettivo consentirebbe di ridurre depositi e/o rilasci in falda di soluti e sostanze azotate legati alla percolazione e al drenaggio dei quantitativi in eccesso  $|V_{off}|$ , annessi alle tipologie di suolo (5.3.3) nell'ipotesi di infiltrazione laterale assente, contribuendo a mitigare

impatti ambientali dovuti all'irrigazione e/o a migliorare la qualità dei prodotti in genere, oltre ad incrementare l'efficienza irrigua del comprensorio, da cui il calcolo di indici appositi e la produzione di mappe inerenti al reparto Sud, per riferimento A e migliore alternativa F (5.3.4).

Minori volumi impiegati recherebbero alla riduzione dei costi energetici da parte del Consorzio (legati al sollevamento dell'acqua per l'immissione seguente in rete); di contro, incrementando il valore di intervento, vantaggi, benefici e stessa utilità di adozione (eventuale) delle soluzioni ivi descritte andrebbero gradatamente attenuandosi, come ovvio.

### **5.3.1 Valutazione comparativa nel merito delle soluzioni di intervento proposte**

Di fianco al caso A, posto a riferimento, è risultato anzitutto interessante rilevare la limitata idoneità di un'alternativa ad apporto fisso e/o prestabilito, raffigurata in B, ad intervento 1,5 cm; la contrapposizione immediata avrà reso l'idea di una risposta solo parzialmente positiva. In termini di risparmio idrico: + 7% del totale irrigato nel 2007; + 0,7% per anno 2008 (beneficio assente). Lo stesso guadagno, seppur minimo, non avrà avuto identicamente luogo nei riguardi della percolazione, che a causa di un repentino e più insistito drenaggio, associato all'eccessiva dose in volume fornita, sarà teso perfino ad accrescere (non tutta l'acqua somministrata viene assorbita nel processo di attingimento da parte della pianta, ma in parte dispersa o impiegata nei processi di scambio col sottosuolo); tale evenienza, quindi, sarà giunta unicamente a dilatarne l'effetto, in presenza di una frequenza di intervento/applicazione ridotta: - 3,8% e - 0,5%, rispettivamente per le annate in oggetto (segno meno che avrà convenzionalmente inteso una mancata riduzione rispetto ad A).

Per le altre soluzioni, il criterio per il calcolo del fabbisogno irriguo è risultato più esattamente legato, in percentuale ( $i_r$  costante), al deficit idrico stimato in specifiche porzioni del profilo di suolo assegnate in SIMOSIS, così definite: intero apparato radicale per scenario C (profondità di conseguenza variabile nel corso di una stagione singola) ed orizzonte, fissato a priori, tra 10 e 50 cm dell'apparato radicale medesimo, per scene D, E, F.

Il raffronto ha chiaramente evidenziato come, in ragione di un intervento variabile, potessero diffusamente ottenersi consistenti risparmi idrici. La contingenza di interesse maggiore, associata ad F, sarà stata corrisposta ad un volume irriguo specifico pari al 10% del deficit d'acqua nello strato di suolo anzidetto; tale evento avrà potuto ricondursi ad un apporto di circa 0,8 cm o 0,7 cm per le due annate (valori medi di intervento singolo), da cui i seguenti risparmi rispetto ad A: 27,4% e 20,6%; conseguentemente, si è ottenuta una minore percolazione in falda, pari rispettivamente a circa 46.800 m<sup>3</sup> (15,2% in meno), ovvero - 40 m<sup>3</sup>/ha in media, e ad oltre 11.800 m<sup>3</sup> (4,3%), cui vi rispondono, nuovamente in media, - 10 m<sup>3</sup>/ha.

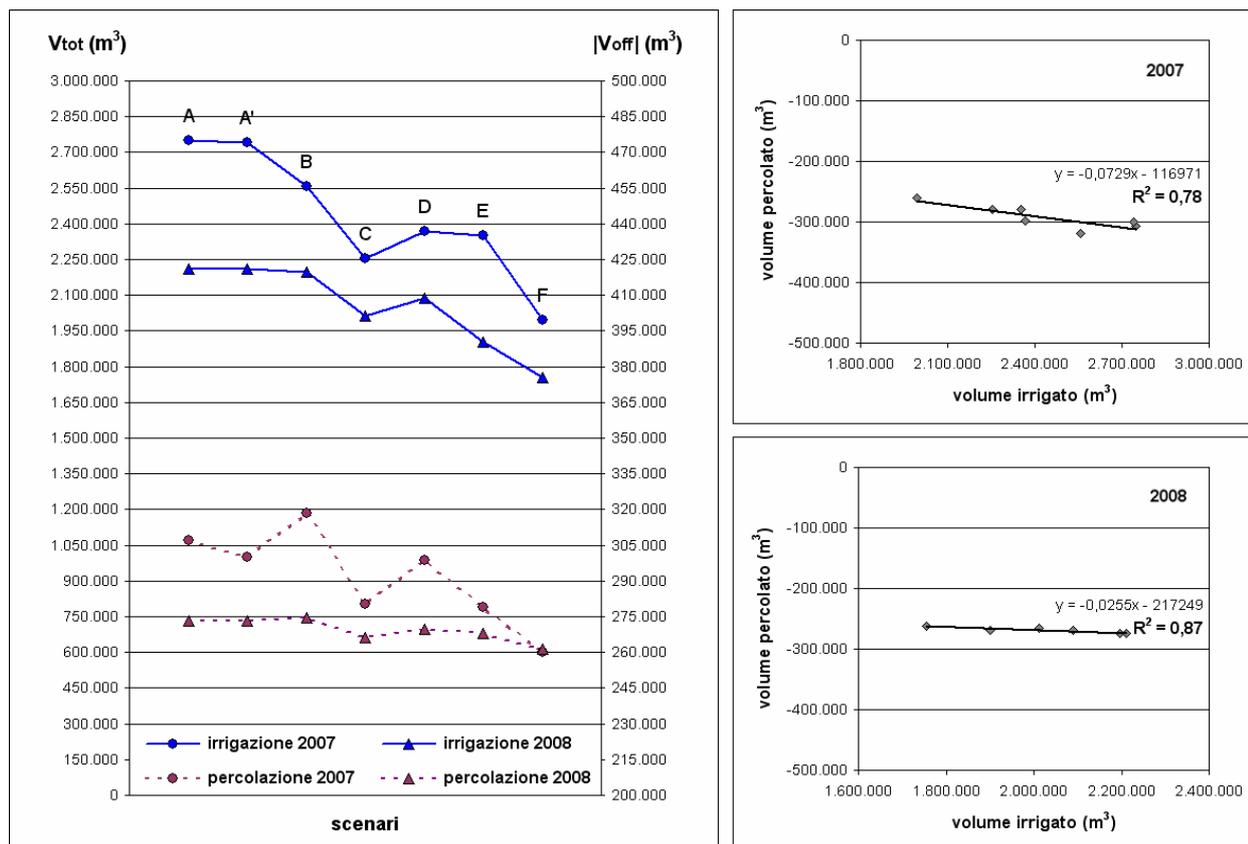


Fig. 5.7 - Rapporto di riduzione 1 : 10 tra volumi irrigati e drenati inferiormente: la legge ottenuta si rivela all'incirca lineare (irrigazioni più spinte avrebbero reso un maggior decremento di volume in eccesso).

Singoli valori del consumo stagionale  $V_{tot}$  e deflusso  $|V_{off}|$ , di fianco a progressive riduzioni, in volume o in percentuale rispetto al caso A, sono stati riportati nella seguente tabella.

SCENARI 2007	$V_{RES}$	IRRIGAZIONE	$V_{tot}$ (m <sup>3</sup> )	riduzione (m <sup>3</sup> )	riduzione (%)	$ V_{off} $ (m <sup>3</sup> )	riduzione (m <sup>3</sup> )	riduzione (%)
A - riferimento	55.000	fissa - 1.2 cm	2.749.354	-	-	-306.887	-	-
B - proposta 1	55.000	fissa - 1.5 cm	2.558.188	191.166	7,0	-318.624	-11.737	-3,8
C - proposta 2	55.000	ir = 15% deficit apparato radicale	2.253.072	496.281	18,1	-280.132	26.755	8,7
D - proposta 3	55.000	ir = 25% deficit 10-50 cm	2.368.194	381.160	13,9	-298.557	8.330	2,7
E - proposta 4	55.000	ir = 15% deficit 10-50 cm	2.352.927	396.427	14,4	-278.841	28.047	9,1
F - proposta 5	55.000	ir = 10% deficit 10-50 cm	1.995.233	754.121	27,4	-260.083	46.804	15,2
A' - proposta 6	45.000	fissa - 1.2 cm	2.741.381	7.973	0,3	-300.112	6.775	2,2

SCENARI 2008	$V_{RES}$	IRRIGAZIONE	$V_{tot}$ (m <sup>3</sup> )	riduzione (m <sup>3</sup> )	riduzione (%)	$ V_{off} $ (m <sup>3</sup> )	riduzione (m <sup>3</sup> )	riduzione (%)
A - riferimento	55.000	fissa - 1.2 cm	2.211.451	-	-	-273.380	-	-
B - proposta 1	55.000	fissa - 1.5 cm	2.195.928	15.523	0,7	-274.749	-1.369	-0,5
C - proposta 2	55.000	ir = 15% deficit apparato radicale	2.013.193	198.258	9,0	-266.293	7.087	2,6
D - proposta 3	55.000	ir = 25% deficit 10-50 cm	2.088.973	122.478	5,5	-269.537	3.843	1,4
E - proposta 4	55.000	ir = 15% deficit 10-50 cm	1.901.496	309.955	14,0	-268.161	5.219	1,9
F - proposta 5	55.000	ir = 10% deficit 10-50 cm	1.755.831	455.620	20,6	-261.556	11.824	4,3

Tab. 5.1 - Scenari di gestione irrigua: riepilogo risultati.

Si noti come il volume di risorsa disponibile sia stato intenzionalmente ridotto nell'ipotesi A' (una forzatura per A), atta a valutare l'eventuale incremento di efficienza derivante da chiusure in rete in caso di domanda eccessiva; ancora una volta, vi sarà corrisposto, un decremento dei volumi erogati dello 0,3%; per ragioni evidenti e implicitamente espone, quest'ultima congiun-

tura sarà differita dalla situazione di riferimento solo per anno 2007 (la stessa azione, operata nei confronti del 2008, al più prossimo alla soglia dei 40.000 m<sup>3</sup>, non avrebbe in alcun modo prodotto correzioni di distribuzione temporale dei volumi globalmente erogati e in parte recati in falda).

In figura, oltre al raffronto non ancora posto tra scenari di riferimento 2007/2008, potrà appunto constatarsi come le sequenze temporali A ed A' coincidano integralmente fino al raggiungimento del nuovo limite di risorsa imposto  $V_{RES} = 45.000 \text{ m}^3$  ( $d = 205$ ); come previsto, di qui in avanti avranno potuto compiersi nell'ordine: forzate quanto inevitabili chiusure in rete all'interno del SIMODIS dal rinnovato attivarsi della condizione  $V_d \leq V_{RES}$ , congrue e necessarie alterazioni nella distribuzione temporale dei prelievi e distanziamento reciproco tra serie medesime.

Limitazioni aggiuntive in volume massimo giornaliero recherebbero ad ingenerare code o tempi di attesa elevati, ovvero, in casi estremi, indurre al possibile blocco del sistema per eccesso di occlusioni/ostruzioni. In questo caso, però, in ragione di soli n. 4 superamenti verificatisi, per scenario di riferimento 2007 ( $d = 205, 213, 214, 217$ ) rispetto alla criticità appresa A', potrà pienamente affermarsi la riflessione preventivamente enunciata, inerente a un possibile sovradimensionamento idraulico del sistema di condotte; peraltro, la contrazione addotta implicherebbe una riduzione del valore di portata entrante nel sistema nelle 16 ore di funzionamento diurno dal valore  $Q_{16} = 940 \text{ l/s}$  ( $0,94 \text{ m}^3/\text{s}$ ) a soli  $770 \text{ l/s}$  ( $0,77 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

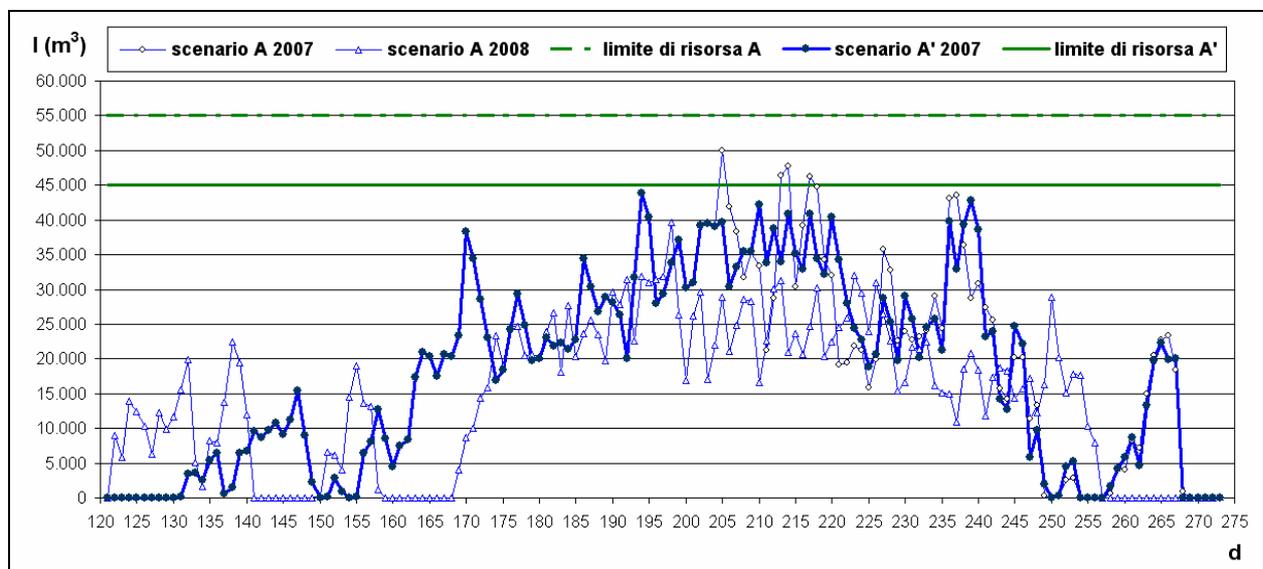


Fig. 5.8 - Scenari di riferimento (A, 2007/2008) e riduzione del limite consentito (da A ad A', 2007).

Risulta opportuno evidenziare come in nessuna delle proposte di intervento si siano appurate riduzioni di traspirazione reale delle colture rispetto al caso di riferimento (in contrasto a quanto ottenuto, avrebbero viceversa potuto instaurarsi condizioni di stress idrico per le stesse piante); pertanto, i risparmi idrici derivati dall'adozione dei criteri di somministrazione apportati non muoverebbero a conseguenze negative sul piano allegato della produttività.

Le verifiche di cui a punti elencati (par. 5.2.4.) saranno state assolte in tutti i casi designati. Si è in definitiva elaborato un confronto attinente alla distribuzione temporale dei volumi in rete per i casi A, E, F, ove potrà denotarsi la progressiva riduzione del quantitativo di risorsa impiegato, in assoluta assenza di crisi sistemiche attribuibili a carenze/inadeguatezze di ordine prettamente gestionale e/o ad imperfezioni/fragilità strutturali propriamente legate del Boscarello.

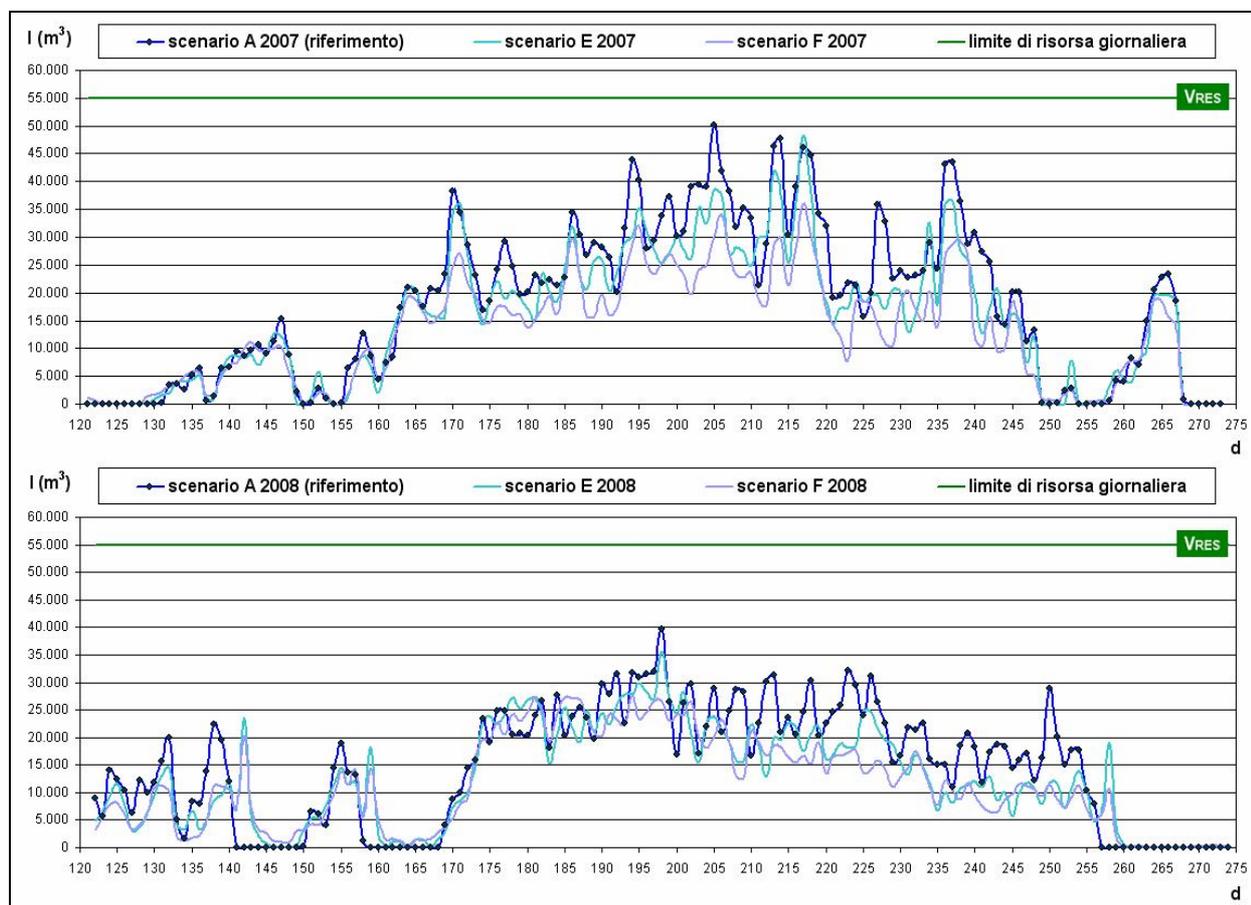
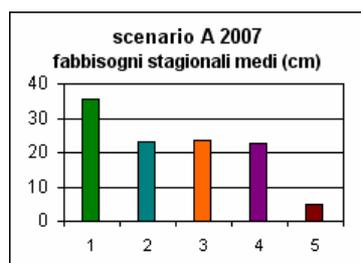


Fig. 5.9 - Efficacia delle alternative E ed F: attesa contrazione in volume erogato rispetto al caso A.

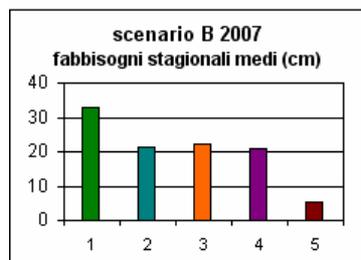
### 5.3.2 Fabbisogni medi e ripartizione dei contributi singoli nell'ambito delle colture intervenute

Gli ordinamenti colturali dedotti dalla classificazione assistita delle immagini satellitari acquisite nel corso delle stagioni investigate (al fine di semplificarne la comparazione/osservazione nel raffronto a barre, anche a causa della stessa numerosità degli scenari in tale fase, è stata convenzionalmente adottata una suddivisione in sole n. 5 macroclassi, accorrandone alcune) avranno visto l'estensione complessiva così ripartita: 1) mais 246 ha; 2) erbai 279 ha; 3) ortive 102 ha; 4) frutteti e uliveti 400 ha; 5) piccolo orti e/o incolto (lavorazioni estive del terreno) 155 ha.

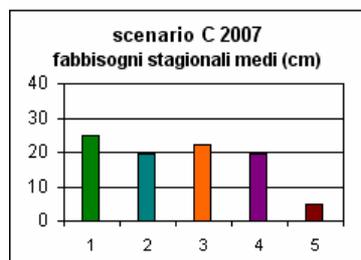
Per ogni soluzione vengono di seguito riportati fabbisogni medi stagionali delle classi in tal modo derivate, valori di intervento (contributi singoli medi, allorquando si fosse trattato di somministrazioni variabili) e relative distribuzioni temporali (frequenze di intervento giugno-agosto).



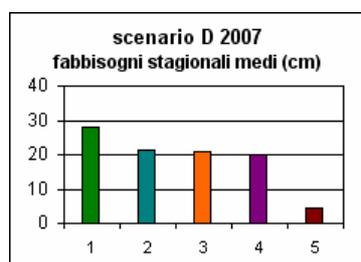
fabbisogno stagionale (m <sup>3</sup> e cm) e valore di intervento medio (cm)		n. interventi medio (giugno-agosto)				
1 - mais	873.886	35,58	1,2	29,7	9,9	2,3
2 - erbai	645.910	23,18	1,2	19,3	6,4	1,5
3 - ortive	241.398	23,61	1,2	19,7	6,6	1,5
4 - frutteti e uliveti	912.873	22,84	1,2	19,0	6,3	1,5
5 - piccoli orti e incolto	75.287	4,85	1,2	4,0	1,3	0,3
<b>2.749.354</b>				stagionali	mensili	settimanali
<b>Vtot (m<sup>3</sup>)</b>						



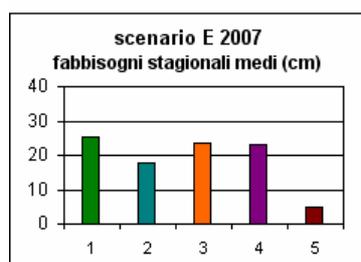
fabbisogno stagionale (m <sup>3</sup> e cm) e valore di intervento medio (cm)		n. interventi medio (giugno-agosto)				
1 - mais	812.888	33,10	1,5	22,1	7,4	1,7
2 - erbai	597.464	21,44	1,5	14,3	4,8	1,1
3 - ortive	228.143	22,31	1,5	14,9	5,0	1,1
4 - frutteti e uliveti	838.608	20,99	1,5	14,0	4,7	1,1
5 - piccoli orti e incolto	81.083	5,23	1,5	3,5	1,2	0,3
<b>2.558.188</b>				stagionali	mensili	settimanali
<b>Vtot (m<sup>3</sup>)</b>						



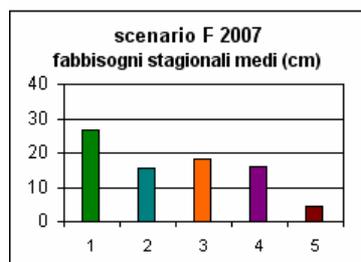
fabbisogno stagionale (m <sup>3</sup> e cm) e valore di intervento medio (cm)		n. interventi medio (giugno-agosto)				
1 - mais	614.716	25,03	0,6	39,1	13,0	3,0
2 - erbai	549.937	19,73	1,1	18,2	6,1	1,4
3 - ortive	226.319	22,14	1,2	17,9	6,0	1,4
4 - frutteti e uliveti	788.712	19,74	1,7	11,6	3,9	0,9
5 - piccoli orti e incolto	73.389	4,73	1,4	3,4	1,1	0,3
<b>2.253.072</b>			<b>1,1</b>	stagionali	mensili	settimanali
<b>Vtot (m<sup>3</sup>)</b>		<b>media ponderata</b>				



fabbisogno stagionale (m <sup>3</sup> e cm) e valore di intervento medio (cm)		n. interventi medio (giugno-agosto)				
1 - mais	692.028	28,18	0,9	30,9	10,3	2,4
2 - erbai	595.789	21,38	1,3	16,2	5,4	1,2
3 - ortive	214.037	20,93	2,0	10,3	3,4	0,8
4 - frutteti e uliveti	797.232	19,95	1,8	11,3	3,8	0,9
5 - piccoli orti e incolto	69.108	4,45	2,8	1,6	0,5	0,1
<b>2.368.194</b>			<b>1,5</b>	stagionali	mensili	settimanali
<b>Vtot (m<sup>3</sup>)</b>		<b>media ponderata</b>				



fabbisogno stagionale (m <sup>3</sup> e cm) e valore di intervento medio (cm)		n. interventi medio (giugno-agosto)				
1 - mais	624.239	25,42	0,6	43,6	14,5	3,4
2 - erbai	496.127	17,80	0,9	20,3	6,8	1,6
3 - ortive	238.572	23,33	1,2	18,7	6,2	1,4
4 - frutteti e uliveti	914.767	22,89	1,1	20,5	6,8	1,6
5 - piccoli orti e incolto	79.222	5,11	1,5	3,4	1,1	0,3
<b>2.352.927</b>			<b>1,0</b>	stagionali	mensili	settimanali
<b>Vtot (m<sup>3</sup>)</b>		<b>media ponderata</b>				



fabbisogno stagionale (m <sup>3</sup> e cm) e valore di intervento medio (cm)		n. interventi medio (giugno-agosto)				
1 - mais	654.636	26,66	0,5	55,6	18,5	4,3
2 - erbai	437.181	15,69	0,7	23,6	7,9	1,8
3 - ortive	186.353	18,23	0,9	20,8	6,9	1,6
4 - frutteti e uliveti	645.151	16,14	0,8	20,2	6,7	1,6
5 - piccoli orti e incolto	71.912	4,63	1,0	4,5	1,5	0,3
<b>1.995.233</b>			<b>0,8</b>	stagionali	mensili	settimanali
<b>Vtot (m<sup>3</sup>)</b>		<b>media ponderata</b>				

Fig. 5.10 - Frequenza di applicazione in aumento (alle differenti scale: stagionale, mensile e settimanale) al ridursi del fabbisogno complessivo e del contributo di intervento medio ponderato sulle classi (2007).

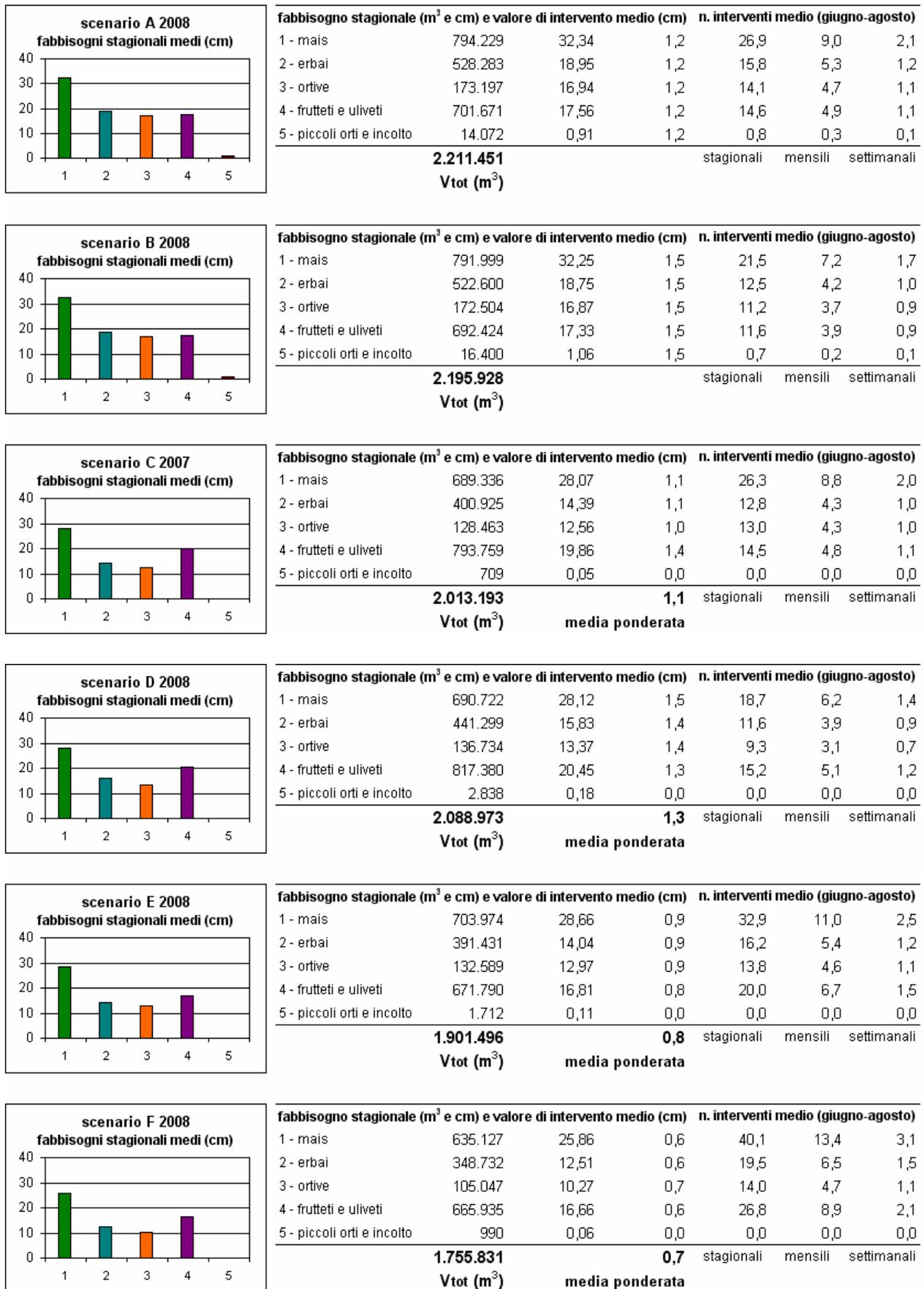


Fig. 5.11 - Frequenza di applicazione in aumento (alle differenti scale: stagionale, mensile e settimanale) al ridursi del fabbisogno complessivo e del contributo di intervento medio ponderato sulle classi (2008).

### 5.3.3 Indice di protettività dei suoli e azione mitigante indotta dalla presenza delle colture

La seguente riflessione è stata rivolta alla comparazione tra classi di suoli appartenenti ad unità pedologiche *UC* distinte (4, 5, 7, 11) e alla scala delle unità terziarie o parcelle *k* (dal momento che ciascuna unità secondaria *j* avrà potuto contenere areali altresì appartenenti a distinte categorie di suolo).

La numerosità delle stesse avrà condotto all'adozione di filtri appositi, atti ad agevolare la ripartizione tra rispondenti *UC*; l'approccio procedurale inerente al caso A, 2007 (per quanto osservato, il più gravoso in termini di quantitativi idrici diretti in falda) avrà consentito di ricavare indici di inefficienza  $|V_{off}|/V_{tot}$  riguardo ai volumi in eccesso, costituenti delle perdite (uscite dal sistema); viceversa, l'efficienza protettiva  $Eff_{ps}$  di un suolo medesimo sarà stata rappresentata dal complemento all'unità di tale rapporto:

$$Eff_{ps} = 1 - |V_{off}|/V_{tot} \quad (5.1)$$

Specificamente al netto degli apporti meteorici, l'unità 4 sarà parsa più vulnerabile rispetto ad altre prese a riferimento: 23% delle unità spettanti a tale classe con  $Eff_{ps} < 0,6$  (oltre il 40% se comparate al valore 0,7 di efficienza moderata o intermedia), come mostrato in tabella.

<b>UC 4 (326 ha)</b>		<b>UC 5 (210 ha)</b>		<b>UC 7 (315 ha)</b>		<b>UC 11 (314 ha)</b>		<b>SCENARIO A 2007</b>	
n. k	% k	n. k	% k	n. k	% k	n. k	% k	<b>classi di efficienza e giudizio relativo</b>	
28	23	10	12	25	17	13	12	$Eff_{ps} \leq 0,6$	ridotta
22	18	4	5	4	3	3	3	$0,6 < Eff_{ps} \leq 0,7$	moderata
21	17	8	10	5	3	9	8	$0,7 < Eff_{ps} \leq 0,8$	media
26	21	30	37	32	22	18	17	$0,8 < Eff_{ps} \leq 0,9$	buona
26	21	30	37	78	54	65	60	$Eff_{ps} > 0,9$	elevata
<b>k in UC 4 = 123</b>		<b>k in UC 5 = 82</b>		<b>k in UC 7 = 144</b>		<b>k in UC 11 = 108</b>		<b>n. parcelle esaminate: 457</b>	
<b>41% <math>\leq 0,7</math></b>		<b>17% <math>\leq 0,7</math></b>		<b>20% <math>\leq 0,7</math></b>		<b>15% <math>\leq 0,7</math></b>		n. parcelle Boscarello: 474	
<b>medio protettivo</b>		<b>molto protettivo</b>		<b>molto protettivo</b>		<b>molto protettivo</b>		k in UC 2 = 12    k in UC 3 = 5	
<small>UC 2 e 3 non indicative ai fini dell'indagine</small>									

Tab. 5.2 - Range di protettività e risposta dei suoli indagati rispetto ai flussi in uscita (2007).

Nel caso F l'indice sarebbe parso in apparenza ad aumentare, causa una riduzione in volume drenato meno che proporzionale al decremento di irrigazione medesima (irrigazioni più spinte favorirebbero senz'altro un maggior decremento dei volumi in eccesso); indici di protettività appartenenti a scenari distinti, rivelandosi scarsamente indicativi nel raffronto, avrebbero prodotto disuguaglianze minime, suscitando eventuali perplessità e/o limitato interesse. Più correttamente, si è ritenuto di riportarne il distacco in termini volumetrici (per cui assoluti) associati alla coltura, per  $|V_{off}| \geq 3$  cm stagionali (discriminante riferito alle parcelle del caso A); quest'ultima contrapposizione, oltre ad evidenziare un livello di protezione decisamente idoneo (mediamente elevato da parte della totalità delle piante osservate), avrà anche asserito, seppur in maniera relativa e limitata (lisciviazione contenuta), come quella del mais sia rinvenuta la sola classe esposta in merito.

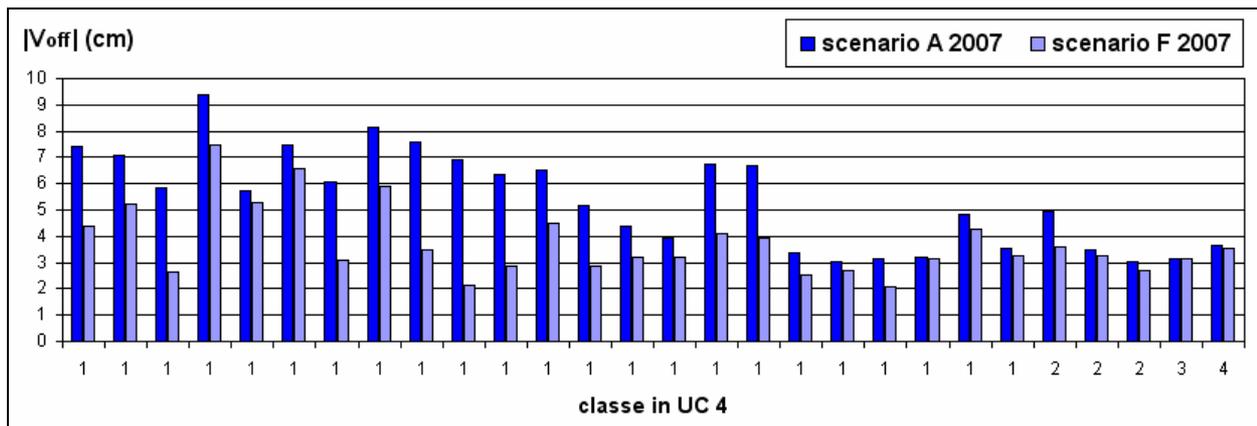


Fig. 5.12 - Legame tra deflussi idrici alla base del profilo UC 4 e colture per scenari A ed F (2007).

### 5.3.4 Produzione di indici ambientali: mappe di efficienza irrigua

I richiamati indici di efficienza irrigua (par. 1.4) di equità distributiva, soddisfacimento dei fabbisogni irrigui massimi e di efficacia dell'irrigazione (beneficio marginale), vengono derivati mediante espressioni riferite alle singole unità secondarie, così identificate:

$$I_{1,j} = \sum_{k=1}^n \frac{I_{i,j,k} / A_{i,j,k}}{I_{i,j} / A_{i,j}} \quad (5.2)$$

$$I_{2,j} = \sum_{k=1}^n \frac{ET_{p\ i,j,k} \cdot A_{i,j,k}}{I_{i,j}} \quad (5.3)$$

$$I_{3,j} = \sum_{k=1}^n \frac{(ET_{a\ i,j,k} - ET_{a\ no\ irr\ i,j,k}) \cdot A_{i,j,k}}{I_{i,j}} \quad (5.4)$$

Il primo, di equità della distribuzione, potrà rendersi utile ogni qual volta l'erogazione venga praticata in quota proporzionale all'area irrigata; dalla corretta conoscenza dei volumi distribuiti per le diverse unità secondarie ( $I_{i,j}$  su  $A_{i,j}$ ) e terziarie ( $I_{i,j,k}$  su  $A_{i,j,k}$ ), di estensione nota, si perviene all'indicatore di uniformità apprezzato.

Il soddisfacimento dei fabbisogni massimi potrà invece valutarsi dal rapporto tra evapotraspirazione potenziale ( $ET_{p\ i,j,k}$  riferito ad  $A_{i,j,k}$ ) e volume irriguo somministrato per ciascuna unità elementare prescelta ( $I_{i,j}$  in  $A_{i,j}$ ); in questo caso, le immagini da satellite dovranno essere impiegate, oltre che per l'individuazione delle aree irrigate, anche per la determinazione del valore  $ET_p$  evidenziato; lo stesso indice potrebbe analogamente ricavarsi a meno del contributo evaporativo, dal rapporto tra traspirazione potenziale e volume irrigato sull'area riferita.

Attraverso l'ultimo di tali indicatori, in parte ottenibile dalla combinazione e/o integrazione dei precedenti due, potrà infine tenersi conto dell'incremento evapotraspirativo attuale (e di pro-

duzione) indotto dall'irrigazione (contributi artificiali e naturali) rispetto al caso asciutto (soli e/o eventuali apporti pluviometrici).

Il calcolo sarà stato riferito al secondo ed al terzo di tali indici, normalizzati tra 0 e 1 rispetto al grado di massima efficienza conseguita dal reparto Sud, per scene A ed F, 2007/2008.

*Il Sistema Informativo apposito (ArcView GIS) avrà nuovamente assistito le singole uscite prodotte dal modello, agevolandone la rappresentazione in forma di mappe tematiche di immediata consultazione, site in appendice D.*

#### **5.4 Sintesi dei risultati e discussione conclusiva**

L'attuazione del DSS SIMODIS alla scala distrettuale del Boscarello e alla scala temporale giornaliera, ha condotto distintamente all'elaborazione e alla produzione di alternativi scenari di gestione irrigua, alcuni di questi con apporto fissato pari ad 1,2 cm (riferimento) e 1,5 cm, altri ancora, invece, ad intervento variabile in virtù del livello di deficit, e alla stima dei rispettivi volumi di intervento; dalla distinta analisi dei risultati proposti può anzitutto comprendersi come la stessa procedura ivi adottata si riveli indispensabile ai fini del risparmio idrico, altresì in relazione alle singole stagioni di riferimento, fino al 27,5% per l'intero comprensorio (anno 2007).

In tutti i casi, ad opera di restrizioni ben precise, si è rivelato possibile distinguere e individuare quale tra le suddette proposte di gestione risultasse più e meglio indirizzata all'incremento dell'efficienza irrigua e alla riduzione dei volumi in eccesso diretti in falda (evenienza prioritariamente atta a garantire imprescindibili effetti di protezione da parte delle colture); tale esame avrà condotto al successivo parallelo, in termini di efficienza irrigua raggiunta dal reparto Sud, tra soli scenari A ed F, di riferimento e maggiore utilità conseguita.

Interessante, in ultimo, è stato rilevare come a quantitativi irrigui apportati progressivamente ridotti nei succitati scenari di gestione alternativa vi sia stato gradatamente corrisposto un volume altrettanto decrescente di percolazione, in primo luogo, prescindendo dalle tipologie di suolo intervenute; un'analisi più approfondita nel merito delle stesse unità pedologiche (in n. 4 di 6), è stata successivamente ripresentata (specificatamente al netto degli apporti meteorici).

L'azione complessivamente svolta dal SIMODIS può così sintetizzarsi:

- scenario A / apporto fissato 1,2 cm (riferimento): i risultati sono stati confrontati con i volumi giornalieri rilevati presso i contatori di reparto (gruppi di consegna, in ragione del 10% della superficie complessiva  $S_{tot}$ , per l'una o per l'altra annata); entità dei prelievi e relative evoluzioni temporali saranno parse prossime alle osservazioni reali, a conferma delle ipotesi preventivamente assunte (fedele ricostruzione e/o riproduzione di quanto effettivamente avveratosi).

- scenario B / apporto fissato 1,5 cm: tale soluzione si sarà rivelata contrastata in termini di risparmio idrico (minimo) e deflusso in falda (in lieve aumento); alla compiuta verifica delle tre condizioni di funzionamento sistemico e alla riduzione del volume irriguo impiegato stagionalmente, avrà risposto un incremento di percolazione, verosimilmente ingenerato o cagionato dalla minor frequenza di applicazione o di intervento singolo alla scala aziendale.

- scenari C, D, E, F / apporto variabile: espresse in funzione del parametro  $i_r$ , selezionato di volta in volta (costante per lo scenario), quale percentuale del deficit  $\delta$  rivelato nello strato impegnato dalle radice (variabile nel tempo in C, oppure specificatamente definito in D, E, F), le alternative saranno apparse tutte tendenzialmente idonee/efficaci e condivisibili sotto il profilo gestionale (verifiche alla scala giornaliera ampiamente soddisfatte) ovvero riguardo agli stessi punti indicati in precedenza (come da attese, quantitativi irrigati e/o in parte diretti in falda progressivamente decrescenti, con legge tra rispettivi contributi all'incirca lineare).

- scenario A' / apporto fissato 1,2 cm in riduzione dell'offerta di risorsa giornaliera: in caso di richiesta eccessiva da parte delle utenze, rinnovo ed imposizione del vincolo  $V_{RES} = 45.000 \text{ m}^3$  comporterebbero una differente ripartizione spazio-temporale della domanda complessiva di impianto, implicando eventuali o ulteriori chiusure in rete nelle 16 ore di funzionamento diurno; ne conseguirebbero, l'abbattimento dei costi energetici annessi al sollevamento/pompaggio della risorsa medesima, la riduzione della portata entrante, dal valore iniziale  $Q_{16} = 940 \text{ l/s}$  ( $0,94 \text{ m}^3/\text{s}$ ), rispondente a  $V_{RES} = 55.000 \text{ m}^3$ , a soli  $770 \text{ l/s}$  ( $0,77 \text{ m}^3/\text{s}$ ), da cui un evidente contrazione di capacità sistemica; una simile ipotesi sarebbe da riferirsi al possibile ridimensionamento del complesso distributivo in pressione: parziale e/o totale riprogettazione per talune aree o settori e specifica sostituzione di alcuni diametri con altri di ampiezza minore.





## **RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

- Abdellaoui R., 1986. *Irrigation system design capacity for on demand operation*. Ph.D. diss. Utah State University
- Agristudio s.r.l., 2004. *Carta Suoli della Campania: i suoli dell'Azienda Improsta, Eboli, Salerno*
- Ait Kadi M., Abdellaoui R., Oulhaj A., Essafi B., 1990. *Design of large scale collective sprinkler irrigation projects for on demand operation: a holistic approach*. 14<sup>th</sup> Intern. Congress on Irrigation and Drainage, Rio de Janeiro, Brasil
- Basso B., 2005. *Digital Terrain Analysis: data source, resolution and application for Modelling Physical Processes in Agroecosystems*. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 2, 5-14
- Bastiaanssen W.G.M., Allen R.G., Droogers P., D'Urso G., Steduto P., 2004. *Inserting man's irrigation and drainage wisdom in soil water flow models and bringing it back out: how far have we progressed?* In J. J.C. van Dam, G.H. de Rooij and R.A. Feddes. *Unsaturated-zone modelling: progress, challenges and applications*, 9, 263-299; ISBN 1-4020-2918-7; Kluwer Publish., Dordrecht, Netherlands
- Bastiaanssen W.G.M., Allen R.G., Droogers P., D'Urso G., Steduto P., 2007. *Twenty-five years modelling irrigated and drained soils*. *Agricultural Water Management J.*, 92, 111-125
- Bausch W.C., 1995. *Remote Sensing: crop coefficients for improving irrigation scheduling of corn*. *Agricultural Water Management J.*, 27, 55-68
- Belmans C., Wesseling J.G., Feddes R.A., 1983. *Simulation of the water balance of a cropped soil*. *SWATRE. Hydrology J.*, 63, 3/4, 271-286
- Bogardi J.J., 1994. *Introduction of system analysis: terminology, concepts, objective functions and constraints*. In J. Bogardi J.J. and Nachtbel H.P. (Eds.). *Multicriteria decision analysis in water resources management*. UNESCO, Paris, 23-32
- Brancaccio L., Cinque A., D'Angelo G., Santangelo N., Sgrosso I., 1987. *Evoluzione tettonica e geomorfologica della piana del Sele (Campania, Appennino meridionale)*. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 10, 47-55, 2ff
- Burt C.M., Clemmens A.J., Strelkoff T.S., Solomon K.H., Bliesner R.D., Howell T.A., Hardy L.A., 1997. *Irrigation performance measures: efficiency and uniformity*. In *J. Irrigation and Drainage Engin.*, 123 6, 423-442
- Burton M.A., 1994. *A simulation of water allocation policies in times of water shortage*. *Irrigation and Drainage Systems*, 8, 61-81
- Clement R., 1966. *Calcul de débits dans le réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande*. *La Houille Blanche*, 5, 553-575
- Colebrook C.F., White C.M., 1937. *Experiments with fluid friction in roughened pipes*. *Proc. of the Royal Soc. of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 161, 906, 367-381
- Dam van J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., Diepen van C.A., Groenendijk P., Walsum van P.E.V., 1997. *Theory of SWAP, vers. 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in soil-water-atmosphere-plant environment*. Report 71, Department Water Resources, Wageningen University (published also as Technical Document 45, DLO Winand Staring Centre, Wageningen)
- Darcy H., 1857. *Recherches Experimentales Relatives au Mouvement de L'Eau dans les Tuyaux*. Mallet-Bachelier (Experimental Research Relating to the Movement of Water in Pipes), Paris, 268 pp.
- De Lorenzi F., Bonfante A., Riccardi M., Alfieri S., Basile A., Menenti M., 2011. *Adattamento dell'agricoltura ai cambiamenti climatici e biodiversità delle specie di maggiore rilevanza produttiva*. *Incontro Agroscenari in Campania*, 27-28 Giugno
- D'Urso G., 2001. *Simulation and management of on-demand irrigation systems: a combined agrohydrological and remote sensing approach*. Monography, Wageningen University; ISBN 90-5808-399-3, 174 pp.
- D'Urso G., Basile A., 1997. *Realizzazione di carte delle proprietà idrauliche dei suoli finalizzate all'applicazione di modelli idrologici alla scala regionale*. *Atti VI Convegno Naz. Ass. Ingegneria Agraria, Ancona, Italia*, 261-272

- D'Urso G., Menenti M., 1995. *Mapping crop coefficients in irrigated areas from Landsat TM images. Proc. European Symp. on Satellite Remote Sensing II, Europto, Paris. SPIE, Intern. Soc. Optical Engin., Bellingham, U.S.A., Vol. 2585, 41-47*
- D'Urso G., Menenti M., Santini A., 1999. *Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management. Agricultural Water Management J., Elsevier, 40, 291-302*
- D'Urso G., Santini A., 2002. *Nuove tecnologie per l'uso razionale della risorsa idrica in agricoltura: simulazione e gestione di sistemi irrigui. Atti del 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, Italia; ISBN 88-7740-340-3*
- Elmaloglu S., Malamos N., 2000. *Simulation of soil moisture content of a prairie field with SWAP 93. Agricultural Water Management, 43, 139-149*
- FAO, 1995. *Use of remote sensing techniques in irrigation and drainage. Proc. Exp. Consultation FAO-Cemagref, Montpellier, Nov. 1993. Food and Agriculture Organization, Water Report n. 4, 201 pp.*
- Feddes R.A., Kabat P., Bakel van P.J.T., Bronswijk J.J.B., Halbertsma J., 1988. *Modelling soil water dynamics in the unsaturated-zone. Hydrology J., 100, 69-111*
- Feddes R.A., Kowalik P.J., Zaradny H., 1978. *Simulation of field water use and crop yield. Monography, PUDOC (Centre for Agricultural Publishing and Documentation), Wageningen, 189 pp.*
- Gallant J.C., 1999. *TERRAE: a new element network tool for hydrological modelling. 2<sup>nd</sup> Inter-Regional Conference on Environment water. Emerging Technologies for Sustainable Water Management, Lausanne, Switzerland, 1-3 September*
- Genuchten van M.Th., 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898*
- Hannan T.C., Coals V.A., 1995. *Real-time water allocation for irrigation. Water and Environment Management J., 9, 1, 19-26*
- Hartkamp A.D., White J.W., Hoogenboom G., 1999. *Interfacing Geographic Information Systems with agronomic modelling. Agronomic J., 91, 761-772*
- Henke R., De Filippis F., Pupo D'Andrea M.R., 1999. *La Riforma della PAC in Agenda 2000: continuità e rottura con il passato. La Questione Agraria, n. 74*
- Ilich N., 1993. *Water resources management model (WRMM) of Alberta environment: model properties and capabilities. Congress on Irrigation and Drainage, The Hague, Netherl.; Transaction of 2<sup>nd</sup> Workshop on Crop-Water Models, 15 pp.*
- Lazzerini B., 2010. *Fuzzy sets and their application to clustering and training (DSS)*
- Lefebre J., 1977. *La regulation dynamique et sa mise en oeuvre au Canal de Provence. La Houille Blanche, 32, 265-270*
- Letey, J., 1993. *Relationship between salinity and efficient water use. Irrig. Sci. 14, 7584*
- Jensen J.R., 1986. *Introductory digital image processing: remote sensing perspective. Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J., U.S.A.*
- Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Bote K.J., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J., Ritchie J.T., 2003. *The DSSAT cropping system model. European J. of Agronomy, 18, 235-265*
- Kularathna M.D.U.P., 1992. *Application of dynamic programming for the analysis of complex water resources systems. Ph.D. diss. Wageningen University, 163 pp.*
- Matthews R., 2002. *Crop-soil simulation models: applications in developing countries. CABI Publishing, Wallingford. Matthews R. and Stephens W (eds.)*
- Menenti M., Azzali S., Visser T.N.M., 1990. *Practical applications of satellite data to irrigation water management. Proc. Intern. Symp. on Remote Sensing and Water Resources, Enschede, Netherlands, 405-418*
- Merriam J.L., 1987. *Symp. introduction. In D.Z. Zimbelmann (Eds.). Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems. Proc. Symp. of the Am. Soc. Civil Engin., 68-71*
- Monteith J.L., 1965. *Evaporation and the environment. The state and movement of water in living organisms, 19<sup>th</sup> Symp. Soc. Exp. Biol., 205-234*
- Moody L.F., 1944. *Friction factors for pipe flow. Transactions of the ASME, Vol. 66.*

- Mualem Y., 1976. *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. In *J. Water Resources*, 12, 513-522
- Penman, H.C., 1948. *Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass*. *Proc. Royal Soc. of London, Vol. A*, 193, 120-145.
- Pereira L.S., Texeira J.L., Farrajota M.P., 1993. *PROREG. A design model for simulating the demand in irrigation projects*. *Congress on Irrigation and Drainage, The Hague, Netherl.; Transaction of 2<sup>nd</sup> Workshop on Crop-Water Models*, 15 pp.
- Postel S., 1993. *Water and Agriculture*. In Gleick P.H. (Eds.). *Water in crisis*. Oxford University press, U. K., 56-66
- Regione Campania, Assessorato all'Agricoltura, SeSIRCA, 2002. *Progetto Carta dei Suoli della Campania: lotto CPI, 1 : 50.000, Piana del Sele, Salerno*
- Raes D., Geerts S., Kipkorir E., 2006. *Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model*. *Agricultural Water Management J.*, 81, 3, 335-357
- Rey J., Hemakumara H.M., 1994. *Decision support systems for water distribution management. Theory and practice*. IIMI Working Paper n. 31, 44 pp.
- Reynolds O., 1883. *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channel*. *Transaction of the Royal Soc.*, 174, 935-982
- Rinaldi M., Borneo V., 2006. *Spatial and temporal analysis of durum wheat productivity in Southern Italy*. *Book of Abstracts, Foggia, Italy, 14-15 September, pdf n. 78*
- Richards L.A., 1931. *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. *Physics I*, 5, 318-333
- Ritchie J.T., 1972. *A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover*. In *J. Water Resources*, 8, 5, 1204-1213
- Santini A., 1975. *Presupposti teorici delle misure idrologiche ed idrauliche nel terreno agrario e forestale*. *Ass. Italiana Ingegneria Agraria, Milano, Italia*
- Santini A., 1992. *Modelling water dynamics in soil-plant-atmosphere system for irrigation problems*. *Excerpta n. 6, Milano, Italy*
- Schul J.J., 1982. *Sprinkler irrigation on demand?* *Quart. J. Intern. Agriculture*, 21 (Special Issue), 4-17
- Sckokai P., Moschini G., 1993. *Interventi "disaccoppiati", riforma della PAC e redditi agricoli: una analisi quantitativa*. *Rivista di Economia Agraria*, n. 3
- Tournon G., 2003. *Irrigazioni, Vol. I, "Manuale di ingegneria civile e ambientale"*, CI259-CI303. Zanichelli-Esac, Bologna, Italia
- Vereecken H., 1988. *PTFs for the generation of hydraulic properties for Belgian soils*. *Ph.D. diss. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium*
- Wang M., Hjelmfelt A.T., 1998. *DEM based on overland flow routing model*. *Hydrologic Engin. J.*, 3, 1, 1-8
- Welles J.M., Norman J.M., 1991. *Instrument for indirect measurement of canopy architecture*. *Agronomy J.*, 83, 818-825
- Wösten J.H.M., 1999. *The Hypress database of hydraulic properties of European soils*. In J. Feyen and K. Wiyo (Eds.). *Modelling of transport processes in soils*, Wageningen, Netherlands, 675-681
- Yeh W., Becker L., Toy D., Graves A.L., 1980. *Central Arizona Project. Operation models*. In *J. Water Resources, Planning and Management, ASCE*, 106, 521-540



***APPENDICE A***  
***ELENCO DEI SIMBOLI***

## ***Simbologia (unità di misura) / Descrizione***

$A$	(ha)	area irrigata
$\alpha$	( $\text{cm}^{-1}$ )	parametro di Van Genuchten per la curva di ritenzione idrica
$\alpha_{rs}$	(-)	coefficiente di riduzione da stress salino
$\alpha_{rw}$	(-)	coefficiente di riduzione da stress idrico
$\beta$	(-)	fattore di attrito in condotta (in senso generico)
$C(h)$	( $\text{d}^{-1}$ )	capacità capillare del mezzo poroso
$d$	(-)	giorno (step temporale in SIMODIS)
$D$	(mm)	diametro del tratto condotta di condotta generico
$\delta$	(cm)	deficit idrico nel suolo rispetto alla saturazione
$\delta_e$	(kPa)	deficit di pressione di vapore
$\Delta$	( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ )	pendenza della curva temperatura - pressione di vapore
$\Delta H$	(m)	perdita di carico in condotta (di tipo distribuito)
$\Delta t_{max}$	(s)	durata di attivazione massima giornaliera del gruppo di consegna
$e_a$	(kPa)	pressione di vapore dell'aria
$e_s$	(kPa)	pressione di vapore alla saturazione
$E_a$	(cm/d)	evaporazione attuale o effettiva giornaliera
$Eff_{ps}$	(-)	efficienza protettiva del suolo
$E_i$	(-)	dato stimato
$E_p$	(cm/d)	evaporazione potenziale giornaliera
$ET_o$	(cm/d)	evapotraspirazione di riferimento giornaliera
$ET_a$	(cm/d)	evapotraspirazione attuale o effettiva giornaliera
$ET_{a\ no\ irr}$	(cm/d)	evapotraspirazione attuale o effettiva giornaliera in assenza di irrigazione
$ET_p$	(cm/d)	evapotraspirazione potenziale giornaliera
$\varepsilon$	(mm)	scabrezza del tratto condotta generico
$f$	(-)	fattore di attrito in condotta di Darcy-Weisbach
$\phi$	( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	porosità
$g$	( $\text{m}/\text{s}^2$ )	accelerazione di gravità
$G_o$	( $\text{W}/\text{m}^2\text{d}$ )	flusso di calore giornaliero nel suolo
$\gamma$	( $\text{N}/\text{m}^3$ )	peso per unità di volume di liquido (o peso specifico)
$ h $	(cm)	potenziale idrico nel suolo (componente matriciale o di pressione)
$ h_{avg} $	(cm)	potenziale idrico medio nello strato di suolo indagato
$h_c$	(cm)	altezza di riferimento del manto vegetale
$ h_{crit} $	(cm)	potenziale idrico critico nello strato di suolo indagato

$H$	(m)	carico totale in condotta
$\hat{H}$	(m)	carico piezometrico in testa al sistema
$H_{i,j}$	(m)	carico piezometrico alla consegna giornaliera (per unità secondaria)
$H_{min}$	(m)	carico piezometrico minimo alla consegna giornaliera
$\eta$	(-)	efficienza globale di sistema
$i$	(-)	unità primaria (distretto, settore o reparto irriguo)
$i-j$	(-)	unità secondaria (alla scala aziendale o comiziale)
$i-j-k$	(-)	unità terziaria (triade identificativa per parcella irrigua generica)
$i_r$	(-)	frazione di riempimento del deficit idrico nel suolo rispetto alla saturazione
$I_{1-2-3,j}$	(-)	indici di efficienza irrigua (specifici per unità secondarie)
$I_o$	(m <sup>3</sup> )	fabbisogno irriguo per intervento singolo giornaliero (in senso generico)
$I_{i,j}$	(m <sup>3</sup> )	distribuzione di domanda irrigua giornaliera (per unità secondaria)
$l$	(-)	parametro di tortuosità della curva di conducibilità idraulica
$\lambda$	(MJ/Kg)	calore latente
$L$	(m)	lunghezza del tratto di condotta generico
$LAI$	(-)	indice di area fogliare
$LAI^*$	(-)	indice di area fogliare da modello, per il tramite dei coefficienti a, b, c
$J$	(m/m)	cadente piezometrica in condotta
$J_{aggreg}$	(-)	gruppi di consegna specifici per misure/stime di natura aggregata
$k$	(cm/d)	conducibilità idraulica
$k_c$	(-)	coefficiente di sviluppo colturale
$k_{sat}$	(cm/d)	conducibilità idraulica alla saturazione
$m, n$	(-)	parametri di forma delle curve di ritenzione e conducibilità, con $m = f(n)$
$M$	(-)	valore medio dati misurati
$M_i$	(-)	valore misurato
$\nu$	(m <sup>2</sup> /s)	viscosità cinematica del fluido
$p$	(N/m <sup>2</sup> )	pressione nel tratto di condotta generico
$p/\gamma$	(m)	altezza piezometrica in condotta
$P$	(cm/d)	piovosità netta giornaliera
$Q$	(m <sup>3</sup> /s)	portata nel tratto di condotta generico
$Q_{16}$	(m <sup>3</sup> /s)	portata entrante nel sistema per funzionamento diurno a 16 ore
$Q_{i,j}$	(m <sup>3</sup> /s)	portata del gruppo di consegna (per unità secondaria)
$Q_{i,j}/I_{i,j}$	(s)	durata dell'applicazione irrigua per intervento singolo giornaliero
$\theta$	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	contenuto idrico volumetrico
$\theta_{res}$	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	contenuto idrico volumetrico residuo
$\theta_{sat}$	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	contenuto idrico volumetrico alla saturazione

$r$	(-)	albedo superficiale
$r_a$	(s/m)	resistenza aerodinamica
$r_c$	(s/m)	resistenza stomatica del manto vegetale
$R^2$	(-)	coefficiente di determinazione (quadrato del coefficiente di correlazione $R$ )
$Re$	(-)	numero di Reynolds
$RH$	(-)	frazione di umidità nell'aria rispetto alla saturazione
$RME$	(-)	errore medio relativo
$RMSE$	(-)	radice dell'errore quadratico medio
$R_n$	(W/m <sup>2</sup> d)	radiazione netta solare giornaliera
$RRMSE$	(-)	radice dell'errore quadratico medio relativo
$\rho$	(g/cm <sup>3</sup> )	densità apparente
$s_c$	(-)	frazione di copertura vegetale
$S$	(-)	grado di saturazione
$S_a$	(d <sup>-1</sup> )	atingimento attuale o effettivo giornaliero
$S_e$	(-)	grado di saturazione effettiva
$SIM/eff$	(-)	rapporto modello/realità
$S(h)$	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> d)	atingimento radicale per unità volumetrica di suolo
$S_p$	(d <sup>-1</sup> )	atingimento potenziale giornaliero
$S_{tot}$	(ha)	superficie irrigabile complessiva
$\sigma$	(mm <sup>2</sup> )	sezione del tratto di condotta generico
$t$	(cm/d)	tasso di traspirazione potenziale
$T$	(°C)	temperatura media giornaliera dell'aria
$T_a$	(cm/d)	traspirazione attuale o effettiva giornaliera
$T_p$	(cm/d)	traspirazione potenziale giornaliera
$u_2$	(m/s)	velocità del vento a 2 m di altitudine dal piano campagna
$UC$	(-)	unità pedologica o di suolo
$v$	(m/s)	velocità nel tratto di condotta generico
$v^2/2g$	(m)	termine cinetico del trinomio di Bernoulli
$V_d$ o $I$	(m <sup>3</sup> )	volume giornaliero di risorsa idrica richiesto (domanda totale di sistema)
$ V_{off} $	(m <sup>3</sup> )	volume stagionale in eccesso (drenaggio in falda)
$V_{RES}$	(m <sup>3</sup> )	volume giornaliero di risorsa idrica disponibile (offerta massima di sistema)
$V_{tot}$	(m <sup>3</sup> )	volume stagionale irrigato (consumo di sistema)
$\xi$	(kPa/°C)	costante psicometrica
$z$	(cm)	quota o profondità (in senso generico)
$z_b$	(m)	quota geometrica in condotta (intesa nel baricentro)
$z_{root}$	(cm)	profondità dello strato radicale a densità costante

***APPENDICE B***  
***ELENCO DELLE FIGURE E DELLE TABELLE***

## ***B1) Elenco delle figure***

- Fig. 1.1 - Il GIS quale collegamento tra misure dirette/indirette, algoritmi di calcolo e flussi informativi.
- Fig. 2.1 - Particolare restrizione del campo di indagine dalla scala regionale a quella locale.
- Fig. 2.2 - Comparazione tra prelievi giornalieri simulati dal SIMODIS e misurati presso i contatori volumetrici di reparto nel comprensorio Gromola di Paestum (1994).
- Fig. 2.3 - Raffronto, in termini cumulati da giugno a settembre, tra i diversi termini di bilancio idrologico, nel distretto irriguo di Gromola, per annate di calibrazione (1994) e validazione (2000).
- Fig. 2.4 - Valori dell'indice di performance irrigua per scenario di riferimento (giugno-settembre, 1994).
- Fig. 2.5 - Impiego del telerilevamento satellitare per le aree di pertinenza del Progetto AQUATER.
- Fig. 2.6 - Definizione del sistema idrico mediante inserimento/collegamento delle diverse componenti.
- Fig. 2.7 - Cuenca del Bajo Guadalquivir: utenze intervenute, invasi e principali connessioni idrauliche.
- Fig. 2.8 - Schemi di funzionamento idraulico ed efficienze relative al variare di afflussi e modalità irrigue.
- Fig. 3.1 - Struttura procedurale del DSS SIMODIS.
- Fig. 3.2 - Flussi operativi alla scala giornaliera del prototipo (informazioni in entrata e verifiche annesse).
- Fig. 3.3 - Legame tra LAI e frazione di copertura vegetale  $s_c$ .
- Fig. 3.4 - Profilo generico di contenuto idrico associato al processo di infiltrazione.
- Fig. 3.5 - Andamento delle funzioni idrauliche di ritenzione e conducibilità in suolo sabbioso e argilloso.
- Fig. 3.6 - Funzione di riduzione del potenziale di Feddes.
- Fig. 3.7 - Tipico esempio di output inerente la distribuzione verticale di potenziale e contenuto idrico.
- Fig. 3.8 - Andamento della piezometrica e linea dei carichi idraulici in regime uniforme e stazionario.
- Fig. 4.1 - Mappa di uso del suolo in Destra Sele (2006) per oltre 16.000 ha irrigabili.
- Fig. 4.2 - Consorzio di Bonifica Destra Sele: limiti comprensoriali e Comuni coinvolti.
- Fig. 4.3 - Impianto irriguo del Boscariello: vasca di accumulo e sala macchine.
- Fig. 4.4 - Sistema automatizzato AcquaCard per la distribuzione regolamentata dell'acqua alle utenze.
- Fig. 4.5 - Aspetto e suddivisione dell'area indagine (fondo in falsi colori; immagine Spot 5, 29/08/2008).
- Fig. 4.6 - Schema di condotte in pressione e modellizzazione gerarchica del DSS irriguo alla domanda.
- Fig. 4.7 - Posizionamento geografico delle aree rispettivamente oggetto di calibrazione e di indagine.
- Fig. 4.8 - Pedologia dell'Azienda Improsta (2004) ed ubicazione dei profili inerenti a ciascuna classe.
- Fig. 4.9 - HYPRES e Vereecken: pedo-funzioni in parallelo.
- Fig. 4.10 - Confronto rappresentativo tra valori di contenuto idrico misurati e stimati ad opera delle PTF.
- Fig. 4.11 - Tipico output a colori originato da tecniche di classificazione automatica (classi 36).
- Fig. 4.12 - Valori del coefficiente colturale  $k_c$  per classi 1 e 3 (mais precoci e tardivi) poste a confronto.
- Fig. 4.13 - Sviluppi fenologici a raffronto: andamento del coefficiente colturale  $k_c$  per classi 4, 6, 8, 12.
- Fig. 4.14 - Centralina per l'osservazione dei parametri agrometeorologici (Azienda Improsta).
- Fig. 4.15 - Piovosità ed evapotraspirazione di riferimento a confronto (maggio-settembre, 2007/2008).
- Fig. 5.1 - Apporti irrigui reali e simulati (fissati e variabili) per un pesco;  $i = 2$  (Sud),  $j = 171$ ,  $k = 1$ .

Fig. 5.2 - Scenario di riferimento (2007): comparazione e correlazione tra stime e misure di prelievo relative ai gruppi di consegna selezionati, in presenza/assenza del comparto Rosale.

Fig. 5.3 - Scenario di riferimento (2008): comparazione e correlazione tra stime e misure di prelievo relative ai gruppi di consegna selezionati, in presenza/assenza del comparto Rosale.

Fig. 5.4 - Classi colturali coinvolte e relativi fabbisogni irrigui (somministrazioni medie stagionali).

Fig. 5.5 - Distribuzione temporale dei prelievi effettivi (previsionati per l'intero impianto) e simulati.

Fig. 5.6 - Andamenti simulati a raffronto: evento di risorsa illimitata e scenario di riferimento.

Fig. 5.7 - Rapporto di riduzione 1 : 10 tra volumi irrigati e drenati inferiormente: la legge ottenuta si rivela all'incirca lineare (irrigazioni più spinte avrebbero reso un maggior decremento di volume in eccesso).

Fig. 5.8 - Scenari di riferimento (A, 2007/2008) e riduzione del limite consentito (da A ad A', 2007).

Fig. 5.9 - Efficacia delle alternative E ed F: attesa contrazione in volume erogato rispetto al caso A.

Fig. 5.10 - Frequenza di applicazione in aumento (alle differenti scale: stagionale, mensile e settimanale) al ridursi del fabbisogno complessivo e del contributo di intervento medio ponderato sulle classi (2007).

Fig. 5.11 - Frequenza di applicazione in aumento (alle differenti scale: stagionale, mensile e settimanale) al ridursi del fabbisogno complessivo e del contributo di intervento medio ponderato sulle classi (2008).

Fig. 5.12 - Legame tra deflussi idrici alla base del profilo UC 4 e colture per scenari A ed F (2007).

## ***B2) Elenco delle tabelle***

Tab. 1.1 - Valori indicativi dell'efficienza irrigua.

Tab. 2.1 - Resa, volume di irrigazione e reddito netto (media  $\pm$  deviazione standard) simulati nei 45 anni.

Tab. 4.1 - Specifiche della rete distributiva: materiali, lunghezza complessiva tratti e diametri intervenuti.

Tab. 4.2 - Parametrizzazione idrologica alla scala distrettuale del Boscarello.

Tab. 4.3 - Principali caratteristiche dei sensori utilizzati (Landsat 5/7 TM, Spot 2, 4 e 5).

Tab. 4.4 - Potenziali critici e profondità radicali delle colture estratte dall'analisi.

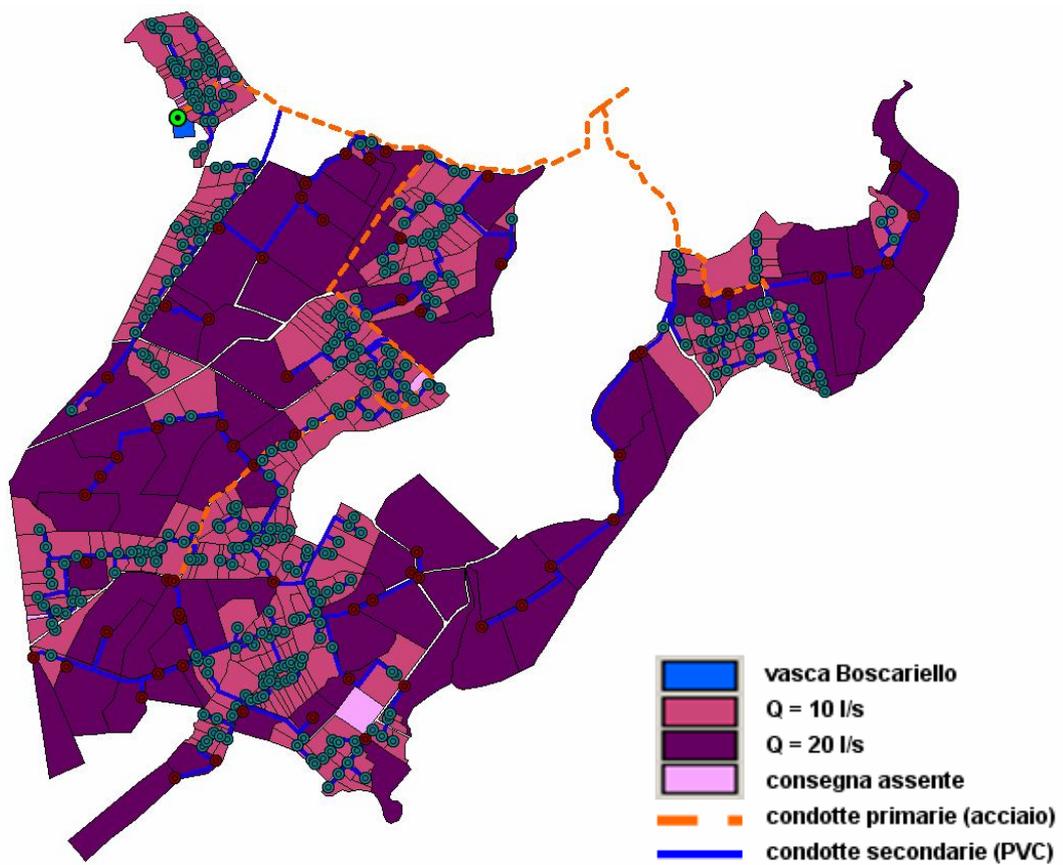
Tab. 5.1 - Scenari di gestione irrigua: riepilogo risultati.

Tab. 5.2 - Range di protettività e risposta dei suoli indagati rispetto ai flussi in uscita (2007).

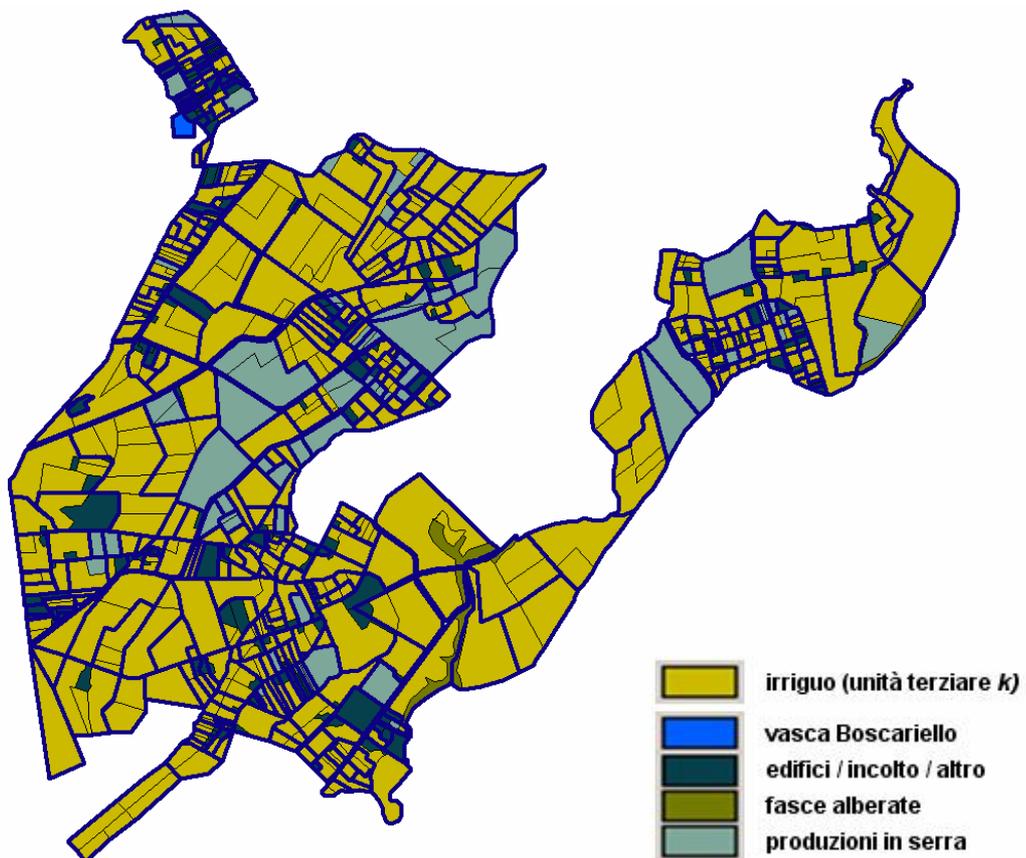


*APPENDICE C*  
*MAPPE TEMATICHE BOSCARIELLO*

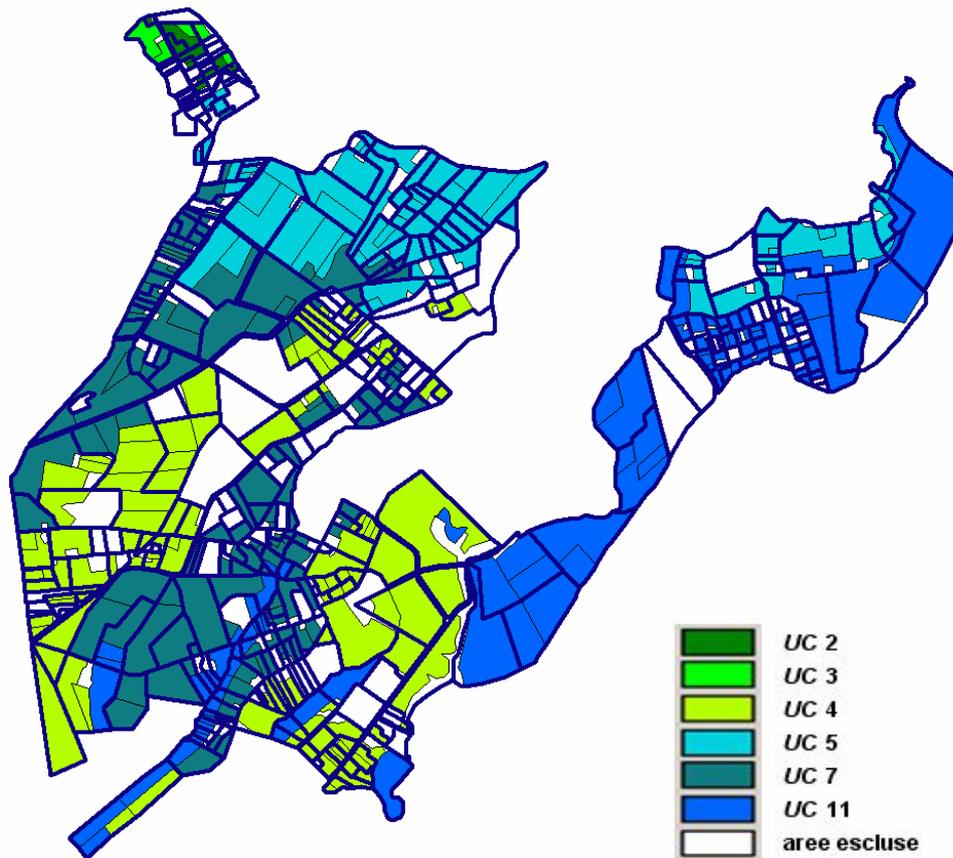
**C1) Sistema distributivo in pressione e ubicazione AcquaFix (scala delle unità secondarie)**



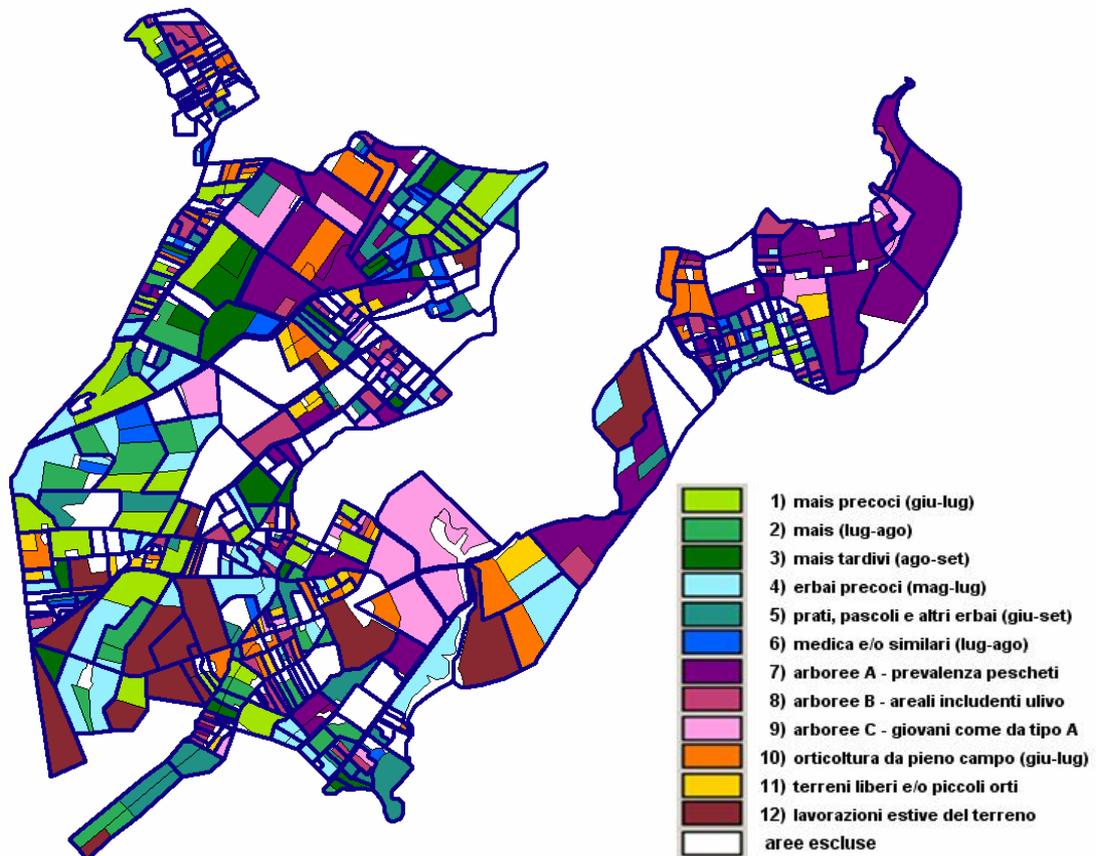
**C2) Sud + Fiocche + Rosale = 1.544 ha (1.182 ha irrigabili / 362 ha esclusi dall'analisi)**



*C3) Associazione parcella-suolo (Regione Campania, 2002)*



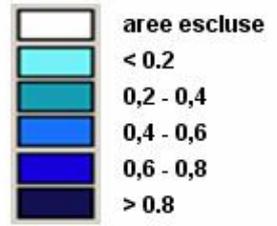
*C4) Associazione parcella-coltura (uso del suolo 2007/2008)*



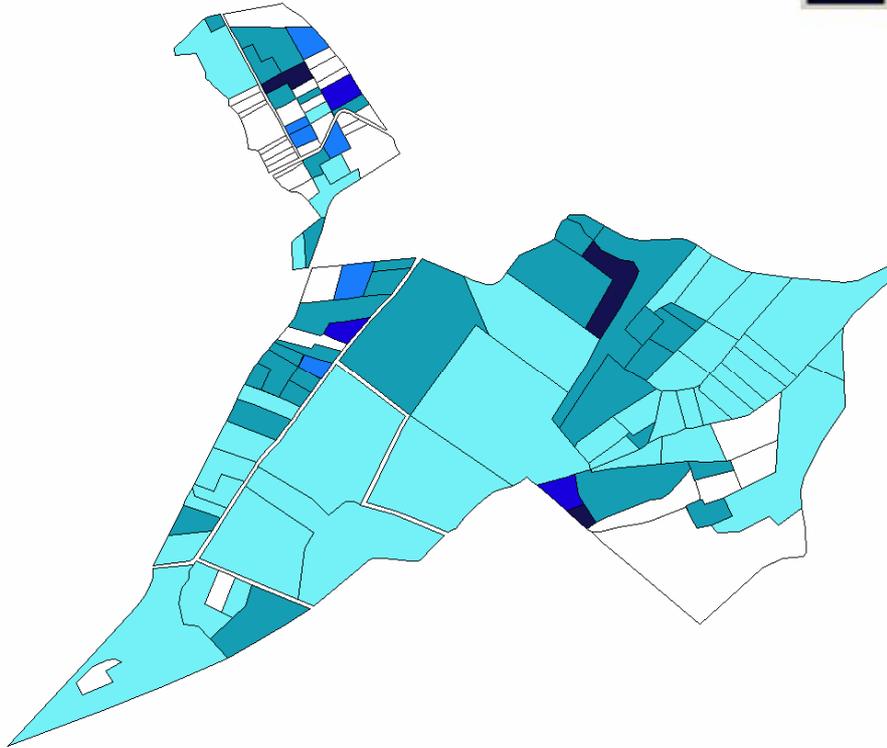


***APPENDICE D***  
***MAPPE TEMATICHE DI EFFICIENZA IRRIGUA***

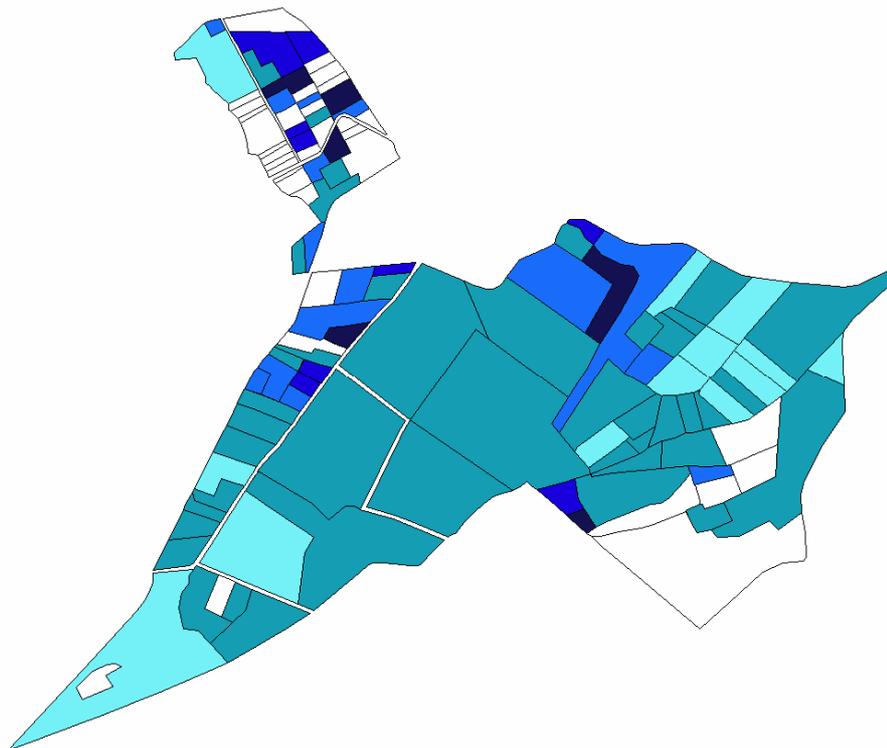
*D1) Indice di efficienza irrigua  $I_{2,j}$  reparto Sud, anno 2007*



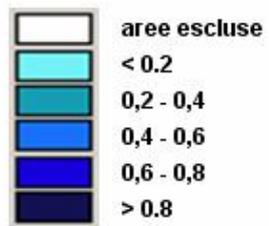
**SCENARIO A**



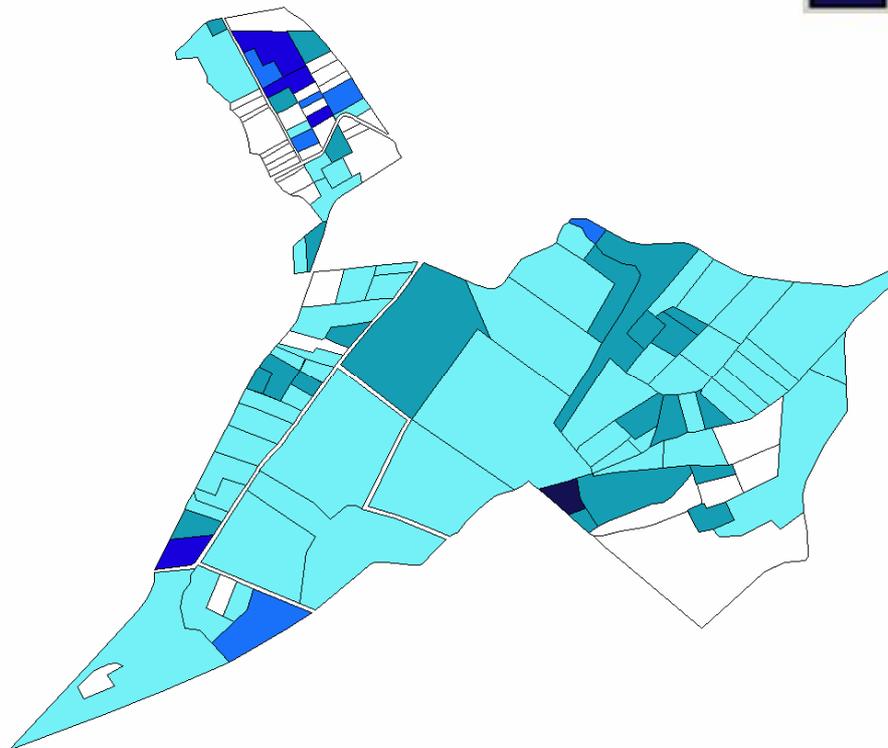
**SCENARIO F**



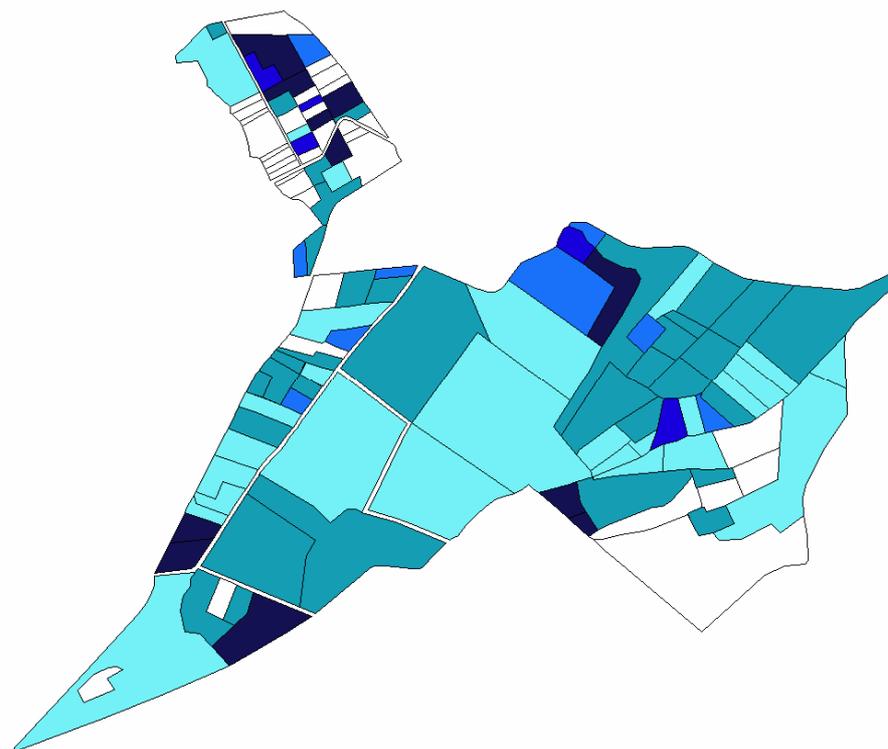
**D2) Indice di efficienza irrigua  $I_{2,j}$  reparto Sud, anno 2008**



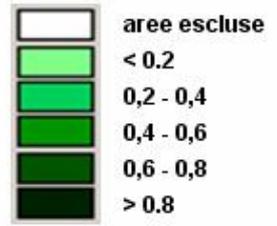
**SCENARIO A**



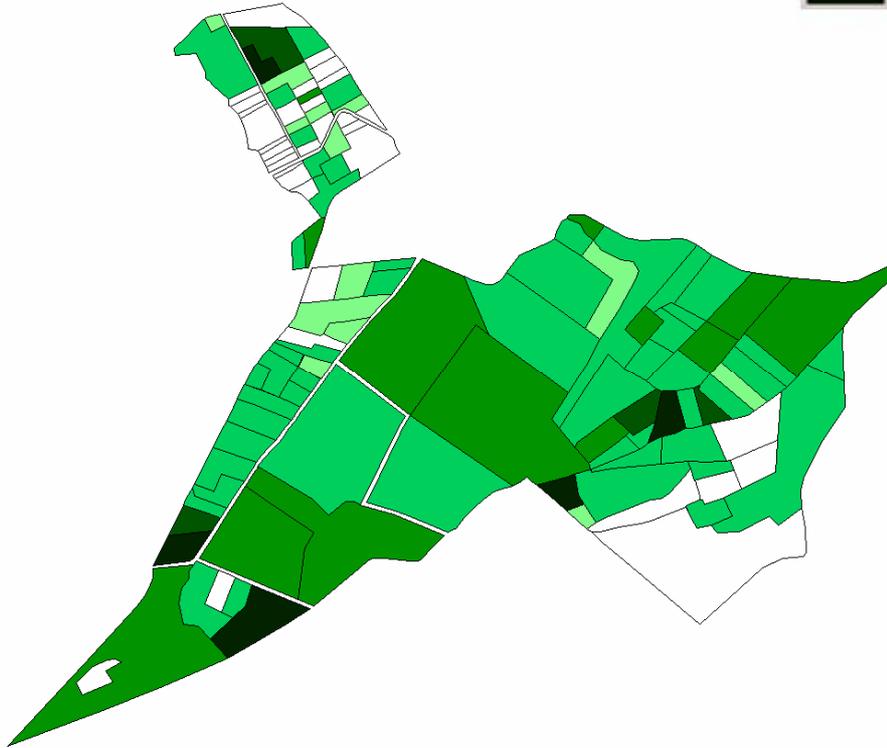
**SCENARIO F**



*D3) Indice di efficienza irrigua  $I_{3,j}$  reparto Sud, anno 2007*



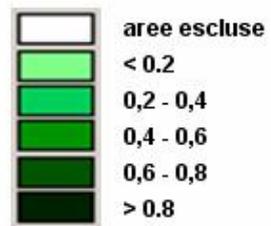
**SCENARIO A**



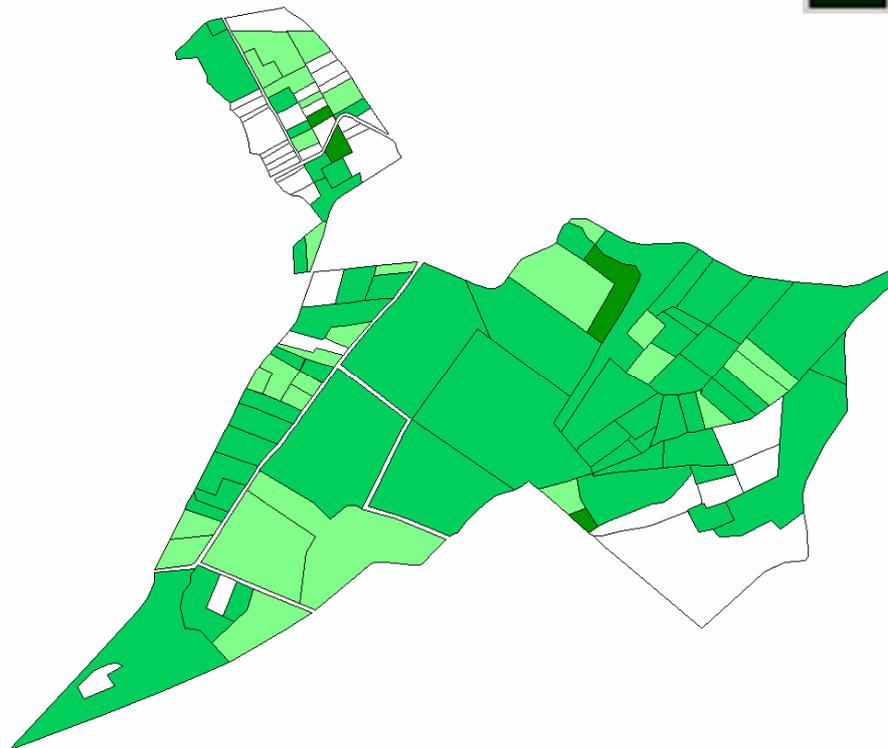
**SCENARIO F**



*D4) Indice di efficienza irrigua  $I_{3,j}$  reparto Sud, anno 2008*



SCENARIO A



SCENARIO F

